

## 전기적방법을 이용한 스트론튬이온 오염토양 제염

김계남 · 원휘준 · 이영희 · 박근일 · 오원진

한국원자력연구소 폐기물처리기술개발팀

### ABSTRACT

After kaolin clay was compulsorily contaminated by  $Sr^{2+}$  solution, the remediation characteristics by electrokinetic method were analyzed. Meanwhile, the numerical code for analysis of electrokinetic migration was developed for modelling of the soil remediation. Experimental results are as follows : After 3 day remediation under 40 voltage, the front part of experimental cell was almost decontaminated, but the behind part didn't almost be decontaminated. Accordingly, the total remediation ratio of  $Sr^{2+}$  from cell soil was about 42.6 %. Also, the total  $Sr^{2+}$  remediation ratio from cell soil was about 84.8 % after 6 days, and about 97.1 % after 7 days. Meanwhile, the values calculated by the developed code almost agreed with experimental values.

---

**Key word** : eletrokinetic soil remediation, strontium, code development, modelling, experimental cell

### 1. 서론

전기적 방법은 재래의 기술로는 가능하지 않은 경우들에 대해서도 오염물질의 이송과 현장 복원의 가능성을 제시한다<sup>1,2)</sup>. 동전기적 방법에 의한 복원에 있어서, 한 쌍의 전극이 오염된 토양에 위치하고, 그들을 가로질러 직류전위를 통과시킨다. 오염물질은 전극에서 전기장 활동 하에 운송된다. 본 논문에서는 동전기적 제염 장치를 제작하여  $Sr^{2+}$ 으로 오염된 Kaolin Clay토양을 제염하여 3일, 6일, 그리고 7일 제염후의 실험셀 내의 잔류 농도를 XRF로 측정하여 동전기적 방법에 의한 제염효율을 분석했다. 또한, 이 동전기적 토양제염을 모델링하기 위해 새로운 수치모델을 개발하였고 이 모델에 의한 예측값과 제염실험값을 서로 비교하여 개발한 수치모델을 검증했다.

### 2. 제염 실험

포화된 점토 샘플은 건조분말 Kaolin Clay로부터 준비됐다. 건조분말 점토에 무게로

40%의 액체 분율이 될 때까지 0.01M  $\text{Sr}^{2+}$  수용액을 넣어 혼합한다. Fig. 1은 실험실 크기의 실험장치이다. 실린더 형태의 실험셀은 길이가 20.0 cm 이고, 직경은 2.8 cm이다. 이 셀의 한쪽은 양극에 다른 한쪽은 음극에 연결되어 있다. 토양샘플 끝에는 여과지, 스텐레스 철망, 티타늄전극이 위치하는 구역이 설치하였다.

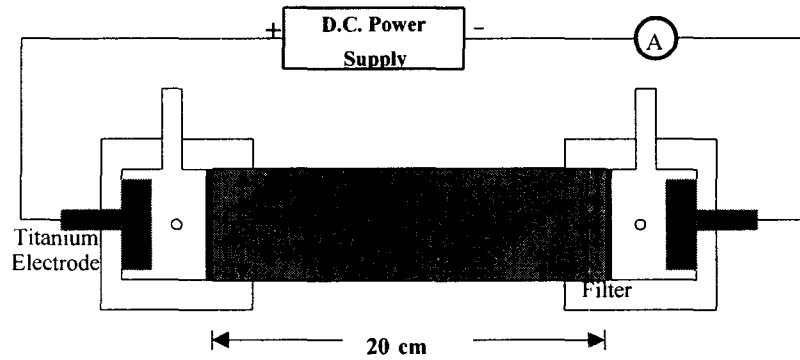


Fig.1. Schematic of cylindrical cell for strontium decontamination studies

### 3. 모델링

셀토양내에 포함된  $\text{Sr}^{2+}$ 은 pH 0-14에서 다른 이온( $\text{H}^+$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ )과 화합물을 형성하지 않기 때문에<sup>3)</sup> 아래에 제시된 모델은  $\text{H}^+$  와  $\text{OH}^-$ 의 생산과 Bulk Water Hydrolysis Reactions과 무관한 전극반응을 포함한다. 이 시스템 내에서 물질운송은 전기장내에서의 이동과 농도경사에 의한 확산 때문이다. 어떤 이온*i*의 시간에 따른 농도변화식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial nC_i}{\partial t} R d_i = \frac{nD_i}{\tau} \frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2} + (u_i z_i F + \frac{\epsilon \zeta}{\mu}) \frac{\partial \phi}{\partial x} \frac{\partial C_i}{\partial x}$$

여기서,  $D_i$ 는 확산계수이고,  $C_i$ 는 토양 속의 오염물질 농도이며  $n$ 은 공극률이며,  $x$ 는 거리를 나타낸다.  $U_{e,i}$ 는 전기이동속도를 나타내며 다음과 같이 이온 전하량과 전기장의 곱으로 표시할 수 있다.  $z$ 는 전하량이고,  $F$ 는 Faraday 상수( $96487 \text{ C mol}^{-1}$ )이며, 또한  $\phi$ 는 셀토양 양쪽 끝에 위치한 전극에 주어진 전압을 나타내며,  $u$ 는 이온의 Mobility 이다.  $\epsilon$ 는 용액의 유전율이며,  $\mu$ 는 용액의 점성도이고,  $\zeta$ 는 입자표면의 제타전위이다.

### 4. 결과 및 고찰

위에서 개발된 모델은 시간함수로써 셀 내의 여러 구간에서 각 이온의 농도를 예측하기 위해 사용될 수 있다. 모델은 적용전류와 적용시간을 변화시킴으로써, 포화 함수비에 대해

해석한다. 전기삼투속도는 제염실험시 유량을 측정하여 산정했으며, 제염 6일 후 전기삼투속도는  $6.7 \times 10^{-4} \text{ cm/min}$ 로 전기이동속도  $3.8 \times 10^{-2} \text{ cm/min}$ 에 비해 상당히 느린 것으로 계산됐다. 그러므로 제염속도는 토양 내의 유체 유동속도에 비례하지 않는다. 또한 Kaolin Clay의 공극율은 0.25이다. 개발된 모델에 의해 구해진 중요한 결과는 시간, 전압, 그리고 거리 함수로서의  $\text{Sr}^{2+}$ 의 농도다. 이들 모델링 결과는  $\text{Sr}^{2+}$  제염 실험후의 셀토양 내의 잔류농도를 XRF로 분석한 결과와 비교했다.

동전기적 제염 장치를 제작하여  $\text{Sr}^{2+}$ 으로 오염된 토양을 전압 40V를 일정하게 가하며 제염한 결과 Fig.2와 같이 3일 경과 후 실험셀 앞부분 토양 내의  $\text{Sr}^{2+}$ 은 거의 제염되었고 중간부분은 거리에 따라 제염비율의 변화가 매우 심하게 나타났다. 그러나 뒷부분은 거의 제염되지 않았다. 셀토양 내의  $\text{Sr}^{2+}$ 의 총제염 비율은 약 42.6%였다. 이것을 똑같은 조건으로 제염실험 장치를 통해 실험한 결과 실험값은 모델 계산값과 상당히 일치한다는 것을 알 수 있었다.

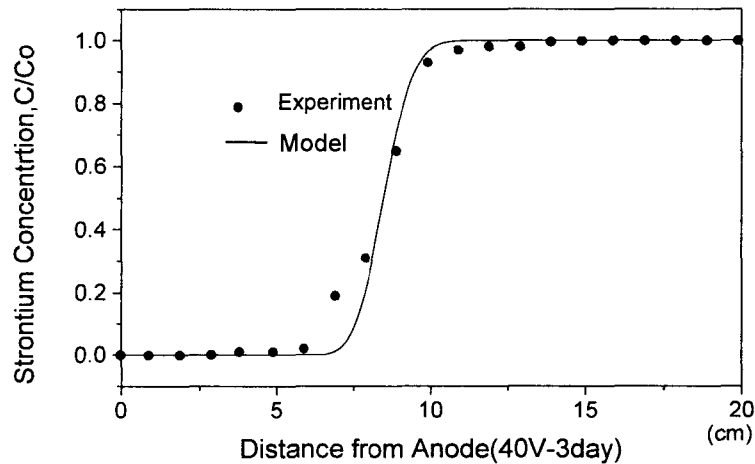


Fig.2.  $\text{Sr}^{2+}$  contamination profile in the soil cell under 40 voltage after 3 days

Fig. 3은 Fig. 2의 경우와 같은 조건으로 제염한 후 6일 경과후 셀토양 내의  $\text{Sr}^{2+}$ 의 분포 농도이다 앞의 약 4/5까지는 거의 제염되었고, 뒷부분만 거리에 따라 제염비율의 변화가 매우 심하게 나타났다. 셀토양의 총제염 비율은 84.8 %로 나타났다. 이것을 똑같은 조건으로 제염실험 장치를 통해 실험한 결과 실험값은 Breakthrough Curve 이외의 지점에서는 모델 계산값과 상당히 일치한다는 것을 알 수 있었다.

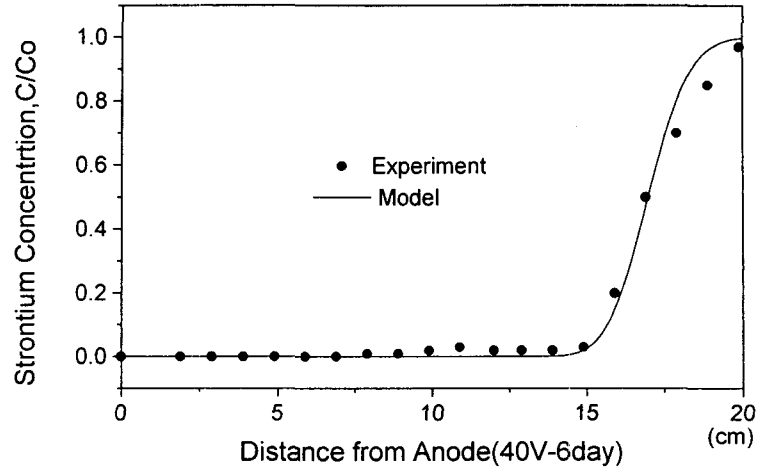


Fig.3. Sr<sup>12</sup> contamination profile in the soil cell under 40 voltage after 6 days

Fig. 4는 Fig. 3의 경우와 같은 조건으로 제염한 후 7일 경과후 셀토양 내의 Sr<sup>21</sup>의 분포농도이다 셀토양 내의 Sr<sup>21</sup> 거의 제염되었고 총제염 비율은 97.1 %로 나타났다.

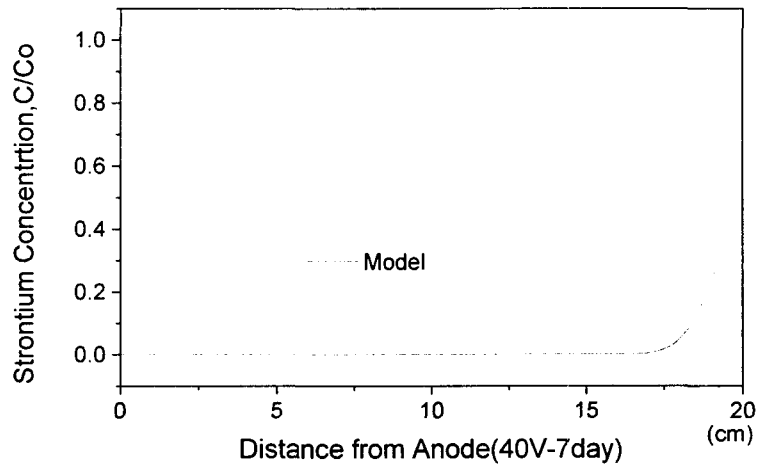


Fig.4. Sr<sup>12</sup> contamination profile in the soil cell under 40 voltage after 7 days

## 5. 결론

동전기적 제염 장치를 제작하여 Sr<sup>21</sup> 으로 오염된 토양을 제염한 결과 3일 경과 후 실험 셀 앞부분 토양 내의 Sr<sup>21</sup> 은 거의 제염되었고 중간부분은 제염비율의 변화가 거리에 따라 매우 심하게 나타났다. 그러나 뒷부분은 거의 제염되지 않았다. 그래서 셀토양 내의 Sr<sup>21</sup>의 총제염 비율은 약 42.6% 였다. 제염실험 6일 경과후 셀토양 내의 총제염 비율은 84.8 % 였

고. 제염실험 7일 경과후 셀토양 내의 총제염 비율은 97.1%였다. 또한, 이 동전기적 토양제염을 모델링하기 위해 새로운 수치모델을 개발하였고 이 모델에 의한 예측치는 제염실험값과 상당한 일치를 보였다.

#### 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력사업의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다

#### 참 고 문 헌

1. Acar, Y.B., and Alshawabkeh, A.N. Principles of Electrokinetic Remediation, Environ. Sci. Technol. 27(13), pp.2638-2647(1993).
2. Largeman,R.,Electroreclamation: Application in Netherands, Environ. Sci. Technol. 27 (13), pp.2648-2650(1993).
3. Pourbaix M., Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions, 2nd Edition, National Association of Corrosion Engineers, Houston, Texas(1974).