

## 진입일장과 진류일장 조건에서의 동전기 정화 현상에 관한 해석

김병일, 김기년, 이호진, 김수삼

한양대학교 토목환경공학과 (geokbi@ihanyang.ac.kr)

### <요약문>

To analysis the electrokinetic phenomena in the ground dependent on the way of applied electric power, such as constant current and constant voltage, the governing equations are derived considering advection, diffusion, ionmigration, and then they were formulated using by finite difference method. The developed program is verified by comparing the tested and predicted results reported in present papers. The results indicate that the slightly small electrical potential is predicted for constant current and for constant voltage pH near to the cathode was small than the test results. But the other predictions including the final suction, pH of electrolyte and cumulative flow are similar to the test results and predictions.

**key word** : Electrokinetic, Electric potential, Electric current, Numerical analysis

### 1. 서론

EK 이동을 나타내기 위한 초기 수치모델은 간극매체에서의 전기삼투 흐름과 동수두 흐름의 복합흐름에 의한 침투 문제에 적용하기 위하여 개발되었다(Lewis and Garner, 1972). 이와 같은 모델의 목적은 지반에서 발생하는 침투압을 예측하기 위한 것으로 유한요소법을 통해 1차원 또는 2차원 문제와 방사형 흐름에서의 문제를 해결하고자 하였다. 한편, 전기장에서의 오염물 이동에 관한 모델은 제한적이지만, 비교적 완벽한 형태의 모델이 Acar와 그의 연구 그룹에 의해 발전되어 왔다. 예를 들면, Acar et al.(1988), Acar et al.(1989), Acar et al.(1990)은 EK 시험동안에 pH가 중요한 역할을 한다고 판단하여 매체에서의 pH 분포를 예측하는 모델을 개발하였다. 그들은 일정한 pH 경계조건으로 Nernst-Plank 방정식의 유한요소해를 제시하였는데, 경계에서 사용된 pH 값은 전극에서의 정상적인 전기분해속도를 고려하여 산정하였다. 최종 발전된 모델은 Acar and Alshwabkeh(1997)에 의해 발표되었으며, 이 모델에서는  $H^+$ 와  $OH^-$ 를 EK 공정에 대한 주 변수로 고려하였고, EK 공정에 의해 발생하는 시료내 동수경사 및 압밀방정식을 고려한 식을 제안하였다. 이 모델은 산의 이동, 납 이동, 전기적 포텐셜과 간극수압 분포를 비교적 잘 예측할 수 있다. 현재까지 이 모델은 EK 정확도에 대한 모델링에 있어 가장 완벽한 모델링으로 간주되고 있다.

## 2. EK 현상에 관한 해석

### 2.1 지배방정식

유체, 전하 및 화학종의 복합 흐름에 관한 모델링은 일반적으로 질량보존 및 에너지보존의 법칙을 만족하는 일련의 시간함수로 표현된 편미분방정식을 기초로 하며, 구성 종(species)들간의 화학반응을 설명하기 위한 비선형 대수방정식들이 이들 편미분방정식에 추가된다. 지반에서의 물질의 이동을 나타내는 미분방정식을 결정하기 위해서는 복잡한 물리화학적 변화 및 지화학적 변화 등을 단순화 시키는 가정 역시 필요하다. 이와 같은 사항을 고려하여 본 연구에서는 종의 이동을 표현하는 지배방정식으로 식 1을 사용하였으며,

$$\frac{\partial nc_i}{\partial t} = D_i^* \frac{\partial^2 c_i}{\partial x^2} + c_i \left[ (u_i^* + k_e) \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + k_h \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \right] + \frac{\partial c_i}{\partial x} \left[ (u_i^* + k_e) \frac{\partial \phi}{\partial x} + k_h \frac{\partial h}{\partial x} \right] + nR_i \quad (1)$$

한 예로  $H^+$ 의 이동 방정식은 아래의 식 2와 같다. 이때 좌변의  $R_{dH}$ 는 자연계수이다.

$$R_{dH} \frac{\partial nc_H}{\partial t} = D_H^* \frac{\partial^2 c_H}{\partial x^2} + c_H \left[ (u_H^* + k_e) \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + k_h \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \right] + \frac{\partial c_H}{\partial x} \left[ (u_H^* + k_e) \frac{\partial \phi}{\partial x} + k_h \frac{\partial h}{\partial x} \right] - nR_H^{eq} \quad (2)$$

### 2.2 경계조건

위의 지배방정식과 유한차분법을 이용하여 개발된 HERO(Hanyang-university Electrokinetic Remediation proGram)에서는 간극수에서 총 3개의 화학종( $Pb^{2+}$ ,  $H^+$ ,  $OH^-$ )의 이동을 설명하기 위해서 3개의 편미분방정식을 사용하였다. 또한, 전기삼투 압밀방정식과 전하보존법칙을 설명하는 방정식을 합쳐 총 5개의 편미분 방정식을 사용하였다. 이에 추가적으로 간극수에서 납의 화학적 반응을 설명하기 위해 4개의 대수방정식 역시 사용되었다. 이와 같은 방정식의 수치해를 얻기 위해서는 1차원인 경우 1개의 편미분 방정식에 대하여 1개의 초기조건과 2개의 경계조건이 요구되므로 총 5개의 초기조건과 10개의 경계조건이 적용되어야 한다(표 1).

Table 1. Initial and boundary conditions in HERO

Variable	Initial condition	Boundary condition(X=0)	Boundary condition(X=1)
$c_H$	$10^{-4}M$	$c_H \Big _{x=0} = \left( \frac{c_H^{anode} J_w - c_H^{enhance}}{L} + \frac{\eta I}{FL} \right) * t$	$c_H \Big _{x=L} = \frac{10^{-14}}{c_{OH}^{cathode}}$
$c_{OH}$	$10^{-10}M$	$c_{OH} \Big _{x=0} = \frac{10^{-14}}{c_H^{anode}}$	$c_{OH} \Big _{x=L} = \left( \frac{c_{OH}^{cathode} J_w}{L} + \frac{\eta I}{FL} \right) * t$
$c_{Pb}$	$0.0825M$	$c_{Pb} \Big _{x=0} = 0$	$c_{Pb} \Big _{x=L} = \frac{c_{Pb}^{initial} J_w}{L} * t$
$\phi$	$\frac{\partial \phi}{\partial x} = 1$	$\phi \Big _{x=0} = \phi_{max}$	$\phi \Big _{x=1} = 0$
$h$	0.0	0.0	0.0

### 2.3 해석 결과

#### 2.3.1 전류일정 조건

전류일정에 대한 HERO의 예측 결과를 Acar and Alshawabkeh(1997)의 실험결과와 그들의 예측 결과와 비교하여 보았다. 그림 1(a)는 EK 정화 50일 후의 시료 내부에서의 전압 분포를 나타낸 것으로 음극 부근의 낮은 전기전도도의 영역 때문에 비선형적인 전압 분포를 보이고 있다. 전기 포텐셜 분포 경

향은 실험과 두 모델의 결과가 유사하다. 실제 실험에서는 최대 50V가 측정되었지만, Acar and Alshawabkeh(1997)는 최대 160V를 예측한 반면 HERO는 최대 10V를 예측하여 두 모델이 실제 결과와는 근접한 예측을 하지 못하고 있다. 이와 같이 예측치와 실측치가 차이가 나는 것은 음극 부근에서의 낮은 전기전도도를 보이는 영역의 범위가 다르기 때문이다. 실험에서 낮은 전기전도도 영역은 모델에서보다 더 빠르게 시료 내부로 전진하고 있다.

그림 1(b)의 경우 최종 시료내 잔류하는 납의 농도를 도시한 것으로 토조 상부(T), 중앙(M), 하부(B)에서의 결과가 함께 도시되어 있다. Acar and Alshawabkeh(1997)의 경우 음극 부근에서 상당히 많은 양의 납 농도를 예측한 반면 HERO의 경우 실측된 결과보다 더 작은 납의 농도를 예측하였다. Acar and Alshawabkeh(1997)의 결과를 좀더 살펴보면 32번 절점 전후에서의 농도 변화 양상을 살펴보면 26번에서는 많은 양의 납이 잔류하고 32번에서 거의 모든 납이 이동하였고 38번 절점은 26번과 유사한 양의 잔류 납농도를 보이고 있다. 이에 대해 Acar and Alshawabkeh(1997)의 경우 실측결과에 부합하는 농도 분포 경향을 제대로 예측하지 못하는 반면 HERO의 경우 음극에 더 가까운 부분까지 납이 이동하는 경향은 있으나 실측 결과와 아주 유사한 농도 분포 경향을 보이고 있다. 이로부터 HERO의 모델링이 Acar and Alshawabkeh(1997)의 모델링 보다 더 실험 결과에 부합하는 모델링을 할 수 있음을 알 수 있었다. 한편, 측정된 전기경사와 예측된 전기경사의 차가 납의 이동 특성에 미치는 영향이 그림 1(b)의 결과에서 분명하게 나타난다. 예측된 전기 경사의 증가는 단지 음극부 5cm에서 발생하였다. 실험의 경우 높은 전기경사의 영역은 음극부에서부터 약 15cm 정도까지 전진하였다. 이와 같은 차이가 결국 납의 이동속도에 영향을 미쳐 농도 감소 위치를 변화시킨 것이다.

그림 1(c)의 경우 시료내부에서 형성된 석션값에 대한 실험 및 예측 결과를 도시한 것으로 두 모델이 실험결과와 유사한 예측을 하고 있는 것으로 판단된다.

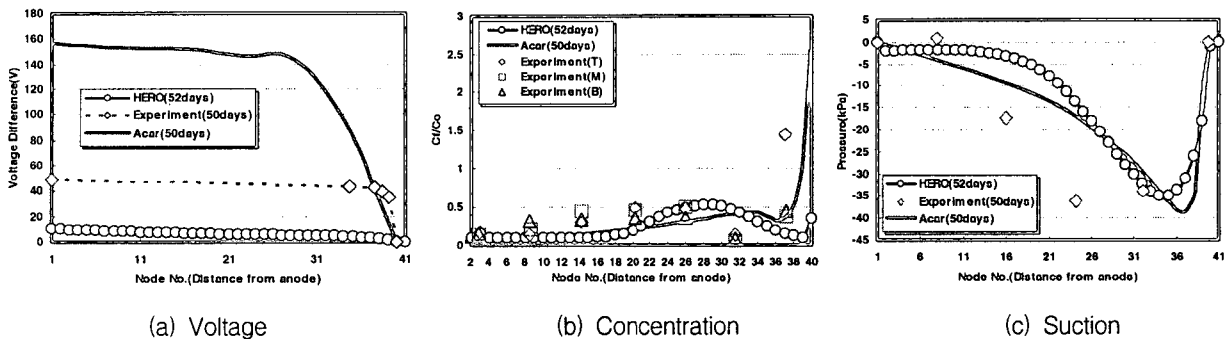


Fig. 1 Comparison of HERO and Acar results

### 2.3.2 전압일정 조건

HERO의 두 번째 검증을 위하여 전압일정 조건에서 실험이 수행되었으며, 이를 유한차분법을 이용하여 모델링한 HERP(한상재, 2000)의 예측결과와 HERO의 예측 결과를 비교/검토 하였다. 실제 E/K 정화 실험이 완료된 이후 각 색션을 절취하여 pH를 측정된 결과는 그림 2와 같다. 두 모델에서 예측한 결과를 살펴보면 음극 부근을 제외하면 전 구간에서 유사한 pH 분포를 보이고 있다.

흙으로부터 음극 배출수로의 납 이동은 흙에서의 pH에 큰 영향을 받게 되는데, 일반적으로 낮은 산성 pH에서 탈착되어 이동 가능한 상태가 되고 염기성 pH에서 침전되어 고정된다. HERP의 경우 납은 음극에 축적되어 음극 배출수로 이동하지 않았다. 그러나 HERO의 경우 음극 배출수로 이동하는 결과를 보였다. 또한 그림에 제시된 바와 같이 12일이 경과된 이후의 농도 예측을 살펴보면 양극부근에 발견된 낮은 pH 지역에서 대부분의 납은 제거되었으나 초기농도의 약 10%는 존재하여 양극근처의 납농

도는 더 이상 감소하지 않았다. 이는 HERP와 HERO의 모델의 결과가 일치한다.

또한, HERP와 HERO에서 예측된 압력분포는 그림 6.10에 제시되어있다. 일반적인 압력분포 형상은 실험에서 관측된 분포와 일치하며 최고 흡입력은 0.8L지역 근처이다. 두 모델이 비교적 실험 결과와 유사한 예측치를 보인 것으로 판단된다.

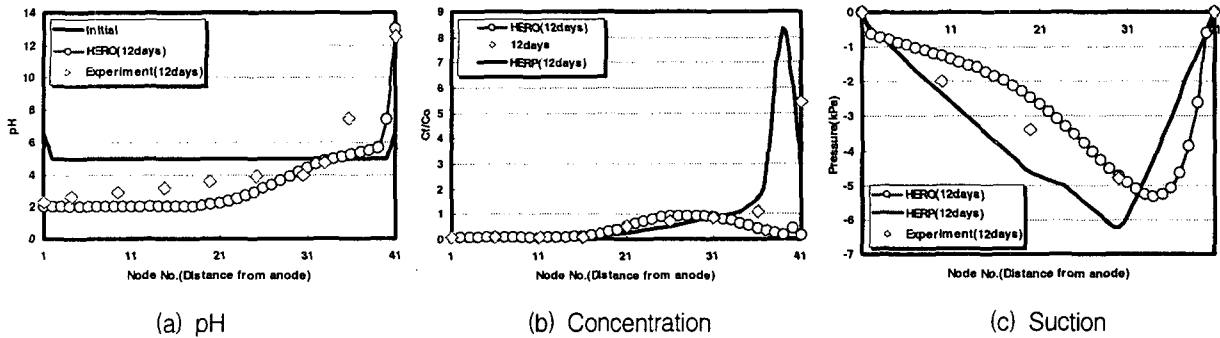


Fig. 2 Comparison of HERO and HERP results

### 3. 결론

공급된 전원 형태에 따른 동전기 특성을 규명하고자 이류, 확산, 이온이동 등을 고려한 지배방정식을 유도하고 이를 유한차분법을 이용하여 수치해석을 시도하였다. 개발된 수치해석 프로그램의 검증에 위하여 기존 문헌에 제시되었던 실험 및 예측 결과들과 비교/분석하였다. 그 결과 전류일정 조건에서는 시료내 전압을 다소 작게 예측하였으며, 전압일정 조건에서는 음극부근의 pH를 작게 예측하는 것으로 나타났다. 그러나, 전체적으로는 전압일정 및 전류일정 조건에서의 해석이 동시에 수행될 수 있는 본 프로그램의 예측치가 기존 결과들과 유사하게 나타나고 있어 향후 동전기 정화 특성 해석에 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

### 4. 참고문헌

1. 한상재(2000). "Electrokinetic 기법에 의한 오염토의 전기삼투와 중금속 이동 특성.", 중앙대학교 박사학위 논문.
2. Acar, Y. B., Alshawabkeh, A. N.(1997). "Theoretical and Experimental Modeling of Multi-Species Transport in Soils Under Electric Fields", US EPA/600/R-97/054.
3. Lewis, R. W., and Garner, R. W.(1972). "A finite element solution of coupled electrokinetic and hydrodynamic flow in porous media." International Journal for Numerical Materials in Engineering, Vol. 5, 41-55.