

Electrokinetic 정화 처리 중 토체내의 특성변화를 고려한 수치해석 프로그램 개발

Development of Numerical Analysis Program Considering Variation of Soil Properties During Electrokinetic Remediation

한상재, 김치열*, 김수삼**
중앙대학교 미래신기술연구소
*중앙대학교 대학원 토목공학과
**중앙대학교 건설환경공학과
(hansj@ms.cau.ac.kr)

ABSTRACT

In this study, the electrokinetic remediation test for the kaolin contaminated by lead was performed and voltage, zeta potential, pH distribution, current, contamination transport in soil sample were studied and finite differential numerical analysis program(HERP) for a contaminated soil were compared with those of test. From the result of HERP, in the anode it was represented that the rest concentration was decreased with the voltage. Hence, if treatment time was continued for a long in the constant voltage, comparing with sample having no change in the rest concentration, it is considered that the voltage gradient is the control factor of the rest concentration.

key word : the electrokinetic remediation, lead, numerical analysis

I. 서론

오염토의 EK정화처리를 위하여 지반에 전류를 적용하면, 전극사이에서 pH와 전해질 농도의 차이가 발생하며, 이러한 pH와 전해질농도의 차이는 EK 처리와 점토표면화학 특성에 복잡한 변화를 유발한다. 흙으로의 산전선의 이동은 토립자 표면의 제타포텐셜을 감소시켜 전기삼투계수인 k_e 를 감소시키고 결과적으로 전기삼투에 의한 흐름량을 감소시킨다. 또한 시료에 걸친 이온의 불균일성으로 전기전도도의 차이로 전압분포 또한 비선형을 나타나게 된다. 처리지반의 초기농도 역시 EK 시스템의 초기조건을 변화시켜 전기삼투에 영향을 미친다. 예를 들면 간극수의 종류 및 농도에 따라 전기삼투의 흐름은 변화하는데 이는 점토의 표면 전기 특성에 대한 오염의 영향을 나타내는 것으로 EK 처리시의 화학적인 변화와 함께 EK 처리를 변화시키는 요소이다.

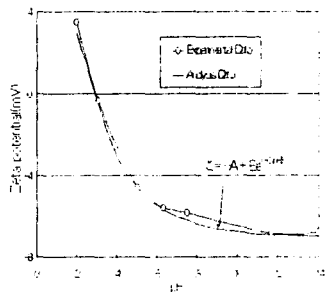
본 연구의 목적은 포화된 점성토에서 EK 처리 때 시료 내에서 발생하는 제 현상의 복잡성과 상관성을 고려한 유한차분 해석 프로그램을 개발하여 각 현상을 예측하는데 있다.

II. EK 정화시 토체 특성의 고려

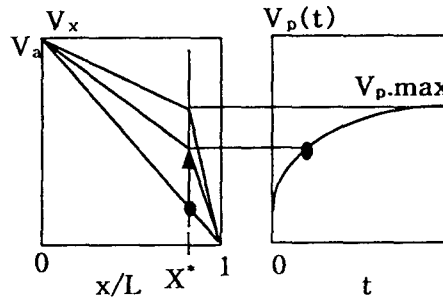
1. pH 변화에 의한 제타포텐셜의 영향 해석

제타포텐셜은 해당 토질 고유 특성 및 간극유체의 pH와 이온농도에 따라 변하며 이는 처리동안에 상수로서 존재하지 않고 위치와 시간에 따라 변한다.

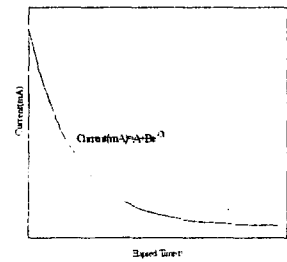
이러한 농도와 pH에 따른 제타포텐셜의 분포는 실측을 통해 <Fig. 1>과 같이 농도에 따라 각 곡선의 방정식을 지수함수로 구하여 시료의 pH 변화에 따라 각 위치에서 고려하면 시간에 따른 제타포텐셜이 pH의 함수로 고려될 수 있다.



<Fig. 1> Example of zeta potential variation



<Fig. 2> Scheme of electrical potential variation



<Fig. 3> Scheme of current variation

2. 시료의 전도도 및 저항 변화

시료의 전도도는 간극수의 농도 및 시간, 위치에 따라 변하며 특히 음극부근에서 시료전체의 저항을 대표한다. 이에 대한 실측을 통하여 시료내의 전압분포 경향 및 전류변화를 고려하여 해석할 수 있다.

즉, 전압 포텐셜 변화 현상을 표현하기 위하여 <Fig. 2>와 같이 급격한 전압분포 변화를 보이는 전압축의 위치와 그곳에서의 전압 크기를 정할 수 있는데 전압이 변하는 축인 X^* 의 위치를 정하고 시간에 따라 축에서 전압의 지수함수적인 증가를 나타내는 지수식을 구할 수 있다.

$$V_p(t) = V_{p,max} - [V_{p,max} - V_a(1 - X^*)] e^{-kt} \quad (1)$$

여기서, $V_{p,max}$ 는 시간 경과에 따른 전압변화 발생 축에서의 전압크기, V_a 는 가해진 전압, k =지수상수.

또한 각 농도에서의 전류변화를 나타내는 곡선을 초기의 전류와 최종의 전류를 구하여 시간의 함수로서 표기하여 구하면 일반적으로 다음과 같이 지수함수로서 가능하다.

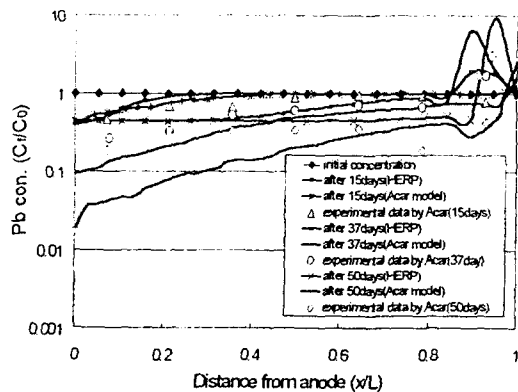
$$\text{Current(mA)} = A + Be^{(-kt)} \quad (2)$$

III. EK 정화특성 해석 프로그램(HERP)의 적용성

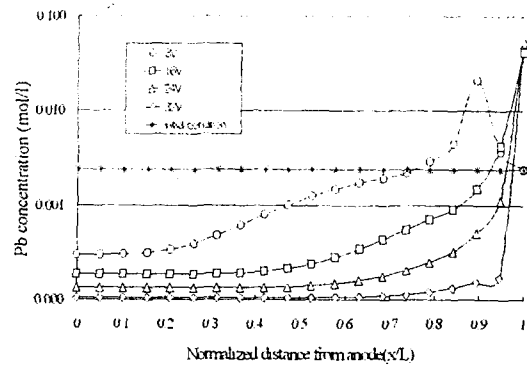
1. 납 분포의 검토

Acar(1996)의 모델 및 실험결과와 HERP와의 비교를 통하여 납농도 분포의 차이점을 동일 시간에 대하여 비교 정리하면 <Fig. 4>와 같다.

Acar(1996)의 모델과 실험결과를 HERP와 비교하면 우선, HERP는 산성전선이 분포하는 양극 부근에서의 납 잔류 농도에 있어 Acar의 모델에 비하여 높은 농도 분포치를 나타내어, 일반적으로 Acar의 실험 결과치와 비교할 때 더 근접한 결과를 보였다. 즉, Acar(1996)의 모델은 양극부근에서의 농도 예측을 시간에 따라 계속 감소하여 과소 평가하는 반면 본 HERP는 시간에 따른 최저 잔류농도가 일정한 값으로 평가되는 특징을 보여 실제 Acar(1996)의 실험결과와 비교할 때 본 HERP가 비교적 타당한 결과를 나타낸다고 판단된다. 이는 산성영역에서의 pH 변화와 제타포텐셜 감소로 전기삼투에 의한 납이동 효율 감소를 비교적 시간에 따라 정확히 고려해준 결과로 판단된다. 또한 본 수치해석결과에 의한 음극영역에서의 수산화 침전은 Acar의 토조 실험결과와 비교할 때 최대치에서 과대 예측되는 경향을 보이고 있으나, Acar 모델은 음극 인근 영역에서의 수산화 침전을 음극 인접 지역에서만 소량 예측할 뿐이어서, 실제 실험결과와 비교할 때 납 분포 예측에 있어 HERP와 차이를 보이고 있다.



<Fig. 4> Comparison Acar(1996) with HERP



<Fig. 5> Predicted effect of applied voltage on the Pb profile after 20 days

2. 전압경사의 영향 시뮬레이션

시료에 높은 전압을 가하면 흐름속도가 빨라지고 따라서 음극으로의 산전선 이동이 더욱 활발히 발생할 것이므로 납 이온 제거는 더욱 클 것이다. 이러한 예상을 본 모델에서 시뮬레이션 하기 위하여 전압의 크기를 바꿔서 시뮬레이션 하여 20일 일때의 전압경사 크기에 따른 납이온 분포의 예측치를 <Fig. 5>에 나타내었다. 전압경사가 클수록 납이온이 제거된 영역과 농도는 증가함을 알 수 있다. 특히 양극(+) 부근에서의 잔류 농도는 전압크기에 따라 감소되는 특성을 보여 전압이 일정한 상태에서의 처리기간을 오래할 경우에 잔류농도의

변화가 없는 것과 비교할 때, 시료에서의 잔류농도를 제어하는데 있어 전압이 중요한 인자임을 알 수 있다. 또한 전압경사가 증가하였다 하더라도 음극에서 시료 외부로 배출되는 납이온은 미미하고 궁극적으로는 수산화 침전하여 축적되는 현상을 보였다. 따라서 전압크기를 변경한다 하여 음극부근에 침전된 납이 제거되는 환경은 조성되지 않을 것이므로 기타 향상 기법을 병행하여야 할 것으로 판단된다.

IV. 요약 및 결론

납으로 오염된 카올린에 대해 실내실험을 수행하여, Electrokinetic 처리 동안 변화하는 시료내의 전압, 전류, 제타포텐셜, 중금속 이동 등의 물리 화학적 현상간 상관성을 연구하였으며, 이러한 특성변화를 고려한 EK 정화 수치 해석 프로그램인 "HERP"를 개발하였고 이를 실험 결과와 비교하여 각 현상을 예측하는데 도움을 주도록 하였다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. Acar(1996)의 모델과 본 연구를 통하여 개발된 HERP를 비교하면 Acar의 모델은 양극 부근에서의 납 잔류량이 시간에 따라 계속 감소하는 특성을 가져 납 농도를 과소 평가하는 반면 본 HERP는 시간에 따라 잔류농도는 일정한 값으로 예측하는 특성을 보여, 실제 Acar 및 본 연구의 실험결과와 비교할 때 더 타당한 예측치를 제시하였다.
2. 시뮬레이션 결과, 양극 부근에서의 잔류 농도는 전압경사를 증가시킴에 따라 감소되는 특성을 보여, 전압이 일정한 상태에서 처리기간을 오래한 경우에 잔류농도의 변화가 없는 것과 비교할 때 전압경사는 시료에서의 잔류농도를 제어하는 중요한 인자로 판단된다.

V. 참고문헌

1. Acar, Y. B., and Alshawabkeh, A. N. "Electrokinetic remediation. I: Pilot-Scale tests with lead-spiked kaolinite." *J. of Geotechnical Engineering*, Vol. 122, No. 3, 173-185. (1996b).
2. Acar, Y. B., and Alshawabkeh, A. N. "Electrokinetic remediation. II: Theoretical model." *J. of Geotechnical Engineering*, Vol. 122, No. 3, 186-196. (1996b).
3. Acar, Y. B., Hamed J. T., Alshawabkeh, A. N., and Gale, R. J. "Removal of cadmium (II) from saturated kaolinite by the application of electrical current." *Geotechnique* 44, No. 2, 239-254. (1994).
4. Alshawabkeh, A. N., Yeung, A. T., and Brika, M. R. "Practical aspects of in-situ electrokinetic extraction." *J. of Environmental Engineering*, Vol. 125, No. 1, 27-35. (1999).
5. Eykholt, G. R., and Daniel, D. E. "Impact of system chemistry on electroosmosis in contaminated soil." *J. of Geotechnical Engineering*, Vol. 120, No. 5, 797-815. (1994).
6. Hamed, J., Acar, Y. B., and Gale, R. J. "Pb(II) removal from kaolinite by electrokinetics" *J. of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 117, No. 2, 240-271. (1991).
7. Hussain, S. A. "Zeta potential measurements on three clays from Turkey and effects of clays on coal flotation." *J. of colloid and interface science*, Vol. 184, No. 2. (1996).