

# 전기저항센서가 부착된 주상실험기에서 측정된 전기저항값을 이용한 용질의 이동해석

## Analysis of Solute Transport based on Electrical Resistance Measurements from Laboratory Column Tests

김용성\* · 김재진\*\* · 박준범\*\*\*

Kim, Yong-Sung · Kim, Jae-Jin · Park, Junbom

### Abstract

A column testing device capable of measuring the electrical resistivity of soil at 3 different locations was developed to verify applicability of bulk electrical conductivity (BEC) breakthrough curves in monitoring contaminant transport. Tracer injection tests were conducted with three different types of saturated sands to obtain average linear velocities and longitudinal hydrodynamic dispersion coefficients based on BEC breakthrough curves and effluent solute breakthrough curves. Comparative analysis of transport parameters obtained from curve fitting the results into the analytical solutions confirmed the validity of resistance measurements in estimating time-continuous resident solute concentration. Under the assumption that a linear relationship exists between  $\sigma_{sat} - \sigma_w - C$ , the BEC breakthrough curves are able to effectively reduce the laborious and time-consuming processes involved in the conventional method of sampling and analysis. In order to reduce possible uncertainties in analyzing the BEC breakthrough curves, it was recommended that resistance measurements take place nearby the effluent boundary. In addition, a sufficient electrical contrast or difference in the electrical conductivity of the influent and the saturating solution is required to conduct reliable analysis.

**Keywords** : bulk electrical conductivity, breakthrough curve, column test, contaminant transport

### 요 지

본 연구에서는 오염용질의 이동특성을 분석하기 위한 측정방법으로서 전기저항센서를 부착한 주상실험기를 개발하였으며 3가지의 포화사질토에 비반응성 추적자를 주입하여 그 적용성을 평가하였다. 측정된 전기저항 값을 바탕으로 전기전도도 파과곡선을 얻었으며, 추정된 농도자료를 이류-확산 방정식에 대입하여 수리분산계수를 산정하였다. 유출수 파과곡선에서 추정된 평균간극유속과 종분산계수를 바탕으로 전기전도도 파과곡선의 신뢰성을 평가해본 결과 전체된  $\sigma_{sat} - \sigma_w - C$ (흙의 전기전도도-간극수의 전기전도도-간극수 내 용질의 농도) 사이의 선형 조건이 성립할 시 측정된 전기저항치는 흙 매질내 간극수 용질의 상대농도를 간접적으로 추정할 수 있는 인자임을 확인하였다. 전기전도도 파과곡선은 실제농도(resident concentration)의 시간적 변화를 나타낼 수 있는 만큼 시간연속적인 전기저항 측정은 많은 시간과 노력이 요구되는 용출수 샘플링과 분석을 효과적으로 대체할 수 있을 것으로 판단되었다. 불확실성을 줄이기 위해 저항측정위치와 주입되는 용액과 포화간극수와의 전기적 차이가 고려되어야함을 확인하였다.

**핵심용어** : 전기전도도, 농도이력곡선, 주상실험, 오염물질 이동해석

### 1. 서 론

지반으로 유입된 오염물질의 거동 특성 분석은 오염지역의 확산 예측 및 정화방법 설계에 있어서 매우 중요한 요소이다. 하지만 오염물질의 물리학적, 화학적 및 생물학적 거동 해석에는 지반이란 매질이 내포하고 있는 불확실성으로 인해 아직도 많은 어려움이 존재한다(Folkes, 1982; Mackay

et al., 1985; Rowe, 1988). 이에 따라 실내실험을 통하여 오염물질의 거동에 영향을 미치는 인자를 규명하고, 이를 바탕으로 개발된 모형이나 이론을 현장의 문제와 정확하게 맞추어 보려는 연구가 꾸준히 보고되고 있다(Freeze and Cherry, 1979; Pinder, 1984; Rowe and Booker, 1985; Shackelford and Redmond, 1995; Maraqa, 2001; Singh, 2006). 대표적으로 수행되는 실내실험으로는 지하수의 일차

\*정회원 · 서울대학교 건설환경공학부 박사과정 (E-mail : escape2@snu.ac.kr)

\*\*서울대학교 건설환경공학부 석사과정 (E-mail : inhakjj@naver.com)

\*\*\*정회원 · 교신저자 · 서울대학교 건설환경공학부 정교수 (E-mail : junbpark@snu.ac.kr)

원 흐름을 재현하여 용질의 수리분산(Hydrodynamic Dispersion) 특성을 예측해보는 실내주상실험(Laboratory Column Test)이 있다. 용질의 시간과 공간에 대한 농도 변화를 파악하고자 유출수를 샘플링하여 농도이력자료를 얻게되며, 이를 이동방정식에 대입하여 수리분산계수를 추정한다.

오염물질의 반응과 거동특성을 해석하고자 수행되는 대부분의 실내실험은 샘플 채취와 농도분석을 필요로 한다. 실내주상실험의 경우, 실험조건에 따라 정확한 용질의 파과곡선을 얻기 위해 다수의 유출수 샘플이 요구되며 대상 오염물질의 농도 분석을 여러번 반복하게 된다는 단점이 있다. 또한, 유출수 샘플링에 의존한 측정을 통한 분석은 단위시간과 단위부피 내 평균농도, 즉 플럭스 평균농도(flux-averaged concentration) 자료를 바탕으로 이루어진다는 한계성을 갖는다. 샘플링을 통하여 얻는 농도이력은 다공성 매질 내 특정위치에서의 실제농도(resident concentration)이력과 일치하지 않으며, 용질의 거동이 분자확산(molecular diffusion)에 의하여 지배적으로 나타날수록 그 차이는 더욱 크게 발생한다. 이에 따라 용질의 실제농도를 신속하고 간편하게 추정해보고자 최근 다양한 센서를 활용하는 기법이 시도되고 있다(Aggelopoulos and Tsakiroglou, 2007; Kumar and Singh, 2005; Yang et al., 2004; Persson et al., 2000). 이들 중 TDR(Time Domain Reflectory) 센서와 전기비저항 센서의 활용이 가장 많이 보고되고 있는데, 매질 내 용질의 실제농도를 실시간으로 추정할 수 있다는 장점을 갖는다. 그러나 흙의 전기적 특성 변화를 바탕으로 용질의 상대적 농도(relative solute concentration)를 예측하는데 있어서 전제되는 가정의 타당성과 측정에 영향을 줄 수 있는 인자들에 대한 연구는 아직까지 부족한 실정이며, 유체흐름의 교란을 최소화할 수 있는 효과적인 센서의 개발도 요구되고 있다.

본 연구에서는 용질의 이동특성을 규명하기위한 새로운 측정방법으로서 3조의 4-electrode 비저항센서를 부착한 주상실험기를 개발하였다. 용질의 물리화학적 반응을 배제할 수 있는 단순한 흐름조건 하에서(지연계수,  $R=1$ ) 적용성을 평가하고자 추적자(tracer) 용액을 다양한 흙 매질에 주입하는 실내주상실험을 수행하였다. 측정된 전기저항 값을 바탕으로 전기전도도 파과곡선(bulk electrical conductivity breakthrough curve)을 얻었으며, 추정된 농도자료를 이류-확산(advection-dispersion) 방정식에 대입하여 수리분산계수를 산정하였다. 추적자 용액의 농도, 유입 방법과 속도가 전기전도도 파과곡선에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였으며 이를 바탕으로 전기전도도 파과곡선이 적용가능한 조건을 제시하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 이류-확산이론 및 경계조건

균질한 포화 다공성매질에서 용질의 1차원 정상류 흐름은 다음과 같은 이류-확산식(convection-dispersion equation, CDE)으로 일반적으로 표현된다.

$$R \frac{\partial C}{\partial t} = D \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right) - v \left( \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (1)$$

여기서  $C$ 는 용질의 평균농도(volume-averaged concentration),  $D$ 는 분산계수,  $R$ 은 지연계수,  $x$ 는 거리,  $v$ 는 평균간극 유속,  $t$ 는 시간이다. 식 (1)에 대한 해석해를 구하기 위해서는 대상흐름에 알맞는 적절한 경계조건이 요구된다. 현재 다양한 경계조건에 대한 해석해가 제안되어 있으나, 반무한 매질의 경우 표 1에 제시된 경계조건이 일반적으로 적용된다(Shackelford and Redmond, 1995). 제시된 해석해는 거리와 시간에 따라 변화하는 용질의 농도를 상대농도( $c(x,t)$ , 표 1 참조)의 개념으로 표현한 식으로서  $C_0$ 와  $C$ 는 각각 유입수 용질의 농도와 흙 매질내 용질의 초기 농도를 나타낸다.

표 1의 해석해는 반무한 매질을 가정하고 있으나 이를 사용하여 유한한 매질의 특정 위치와 시간에서 발생하는 농도를 예측해볼 수 있다. 즉, 실내주상실험의 경우 거리를 대상 시료의 길이( $L$ )와 일치하게 결정함으로써(i.e.  $x=L$ ) 유출수 농도 자료를 대입해볼 수 있는 것이다. 그러나 이러한 접근 방법은 유출수 샘플링을 통하여 얻는 농도이력이 실제농도가 아닌 플럭스 평균농도 자료이기 때문에 개념적으로 잘못되었다고 할 수 있다(Shackelford, 1994). 예를 들어 간극수의 흐름이 없는 경우 오로지 확산에 의하여 발생하는 용질의 이동은 플럭스농도 개념으로는 설명될 수 없는 것이다. 따라서 용질의 이동이 분자확산에 의하여 지배적으로 나타나는 낮은 흐름 조건의 경우 다공성 매질 내 특정위치에서의 실제농도(volume-averaged or resident concentration)를 추정할 수 있을 시에만 정확한 해석이 이루어진다. 유출 경계가 매질내 용질의 흐름을 방해하지 않는다는 추가적인 가정이 주어질 경우, 플럭스 평균농도 개념에 적합한 해석해를 도출해볼 수 있다(van Genuchten and Wierenga, 1986).

### 2.2 포화사질토 및 간극유체의 전기전도 특성

흙에서의 전기전도는 대부분 연결된 간극유체 안에서 발생한다. 이는 흙에서 흔히 발견되는 광물에서는 이동성 전자의 수와 이온들의 이동도가 매우 작기 때문이다. 일반적으로 흙에서 발생하는 전기전도는 간극유체의 전기전도도, 흙입자의 간극률과 입자 골격, 포화도와 굴곡도에 영향을 받는 것으로 알려져 있다(유동주 등, 2006). 흙의 전기전도 특성에 대한 선구적 연구를 수행한 Archie(1942)는 흙과 간극수로 이루어진 매질의 전기전도도는 간극률과 입자의 구조(fabric)에

표 1. 반무한 매질 내 용질의 이동을 표현하는 경계조건 및 해석해 ( $C(x,t)$ 는  $t$ 시간에서  $x$  위치의 간극유체 내 용질의 농도)

유입 경계 조건	유출 경계 조건	해석해
$\left(-D \frac{\partial C}{\partial x} + vC\right) \Big _{x=0} = vC_0$	$\frac{\partial C}{\partial x}(\infty, t) = 0$	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>c(x,t) = [C(x,t) - C_i] / (C_0 - C_i)</math></li> <li><math>c = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[ \frac{Rx - vt}{e(DRt)^{1/2}} \right] + \left( \frac{v^2 t}{\pi DR} \right)^{1/2} \exp \left[ -\frac{(Rx - vt)^2}{4DRt} \right] - \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{vx}{D} + \frac{v^2 t}{DR} \right) \exp \left( \frac{vx}{D} \right) \operatorname{erfc} \left[ \frac{Rx + vt}{2(DRt)^{1/2}} \right]</math></li> </ul>

의한다고 가정하고 다양한 조건의 포화된 사질토에 대하여 전기전도도를 측정하였다. 흙 입자 자체는 전도성이 없다는 가정 하에 포화된 흙의 전기전도도와 간극수의 전기전도도 사이의 비례관계를 제시하였다. 비례변수인(Formation Factor)는 흙의 간극률과 흙 매질의 구조와 관련된 2개의 경험적 상수들로 이루어져 있으며, 이를 바탕으로 전기비저항 측정은 포화된 사질토 지반의 간극률을 추정하는데 널리 활용되어 왔다(Campanella and Weemees 1990).

반면, 간극유체에서의 전기전도는 미시적인 관점에서 이온의 높은 이동도로 인하여 발생한다고 볼 수 있다. 간극유체 내에서 발생하는 전기전도는 용액에 존재하는 이온의 종류에 따라 달라지며, 연결된 흙 입자의 표면을 통하여 발생하는 전기전도에 비해 월등히 높게 나타난다. 이온과 이온사이의 상호작용을 무시할 수 있는 비교적 낮은 농도 하에서 간극유체의 전기전도도는 이온의 농도에 비례하며, 간극유체 내에 하나 이상의 이온이 존재한다면 전기전도도는 각각의 이온들로 발생하는 전도도의 합으로 나타낼 수 있다(Reiger, 1987; Klein 1999; Santamarina et al., 2001).

### 2.3 전기전도도 파과곡선

실내주상실험에서 얻는 파과곡선은 시간에 대한 주입 용질의 상대농도를 나타낸 곡선이다. 비반응성 추적자를 주입하는 경우 주입형태에 따라 파과곡선은 다른 모양을 갖는데, 시간에 따라 지속적으로 유입되는 연속주입(continuous input)인 경우는 상대농도가 증가하다가 일정시간이 지난 후 최대값( $c(x,t)=1$ )으로 수렴하는 'S-모양' 파과곡선 형태를 나타낸다. 반면, 주입용액이 비연속주입(pulse input)인 경우, 상대농도는 최대값을 중심으로 증가/감소하는 '벨-모양'의 파과곡선 형태를 나타낸다. 상대적으로 낮은 유속 하에서 실내 주상실험을 수행할 경우, 용질의 확산으로 인해 비연속주입의 상대농도 최고값은 1보다 작게 나타날 수도 있다(Kreft and Zuber, 1978; van Genuchten and Parker, 1984).

본 연구에는 포화 사질토의 전기전도도( $\sigma_{sat}$ )와 간극수의 전기전도도( $\sigma_w$ )의 선형적 비례관계(Archie's Law, 1942), 그리고 간극유체내 용질의 농도(C)와 간극수의 전기전도도의 선형적 비례관계(Reiger, 1987; Klein 1999; Santamarina et al., 2001)를 바탕으로 식 (2)와 같이 간극유체 내 용질의 상대농도를 포화사질토의 상대전기전도도로 표현하였다.

$$c(x,t) = \frac{[C(x,t) - C_i]}{(C_0 - C_i)} = \frac{(\sigma(x,t) - \sigma_{min})}{(\sigma_{max} - \sigma_{min})} \quad (2)$$

여기서,  $\sigma(x,t)$ 는 t시간에서 x 위치의 흙의 전기전도도,  $\sigma_{max}$ 는  $C_0$ 의 농도를 갖는 주입용액으로 포화된 흙의 전기전도도, 그리고  $\sigma_{min}$ 는  $C_i$ 의 농도를 갖는 간극유체로 포화된 흙의 전기전도도를 의미한다.

식 (2)가 성립하기 위한 중요한 필수 조건은 연구하고자하는 대상용질이 전하 운반자로서 측정되는 흙의 전기저항에 영향을 미치는 유일한 용질이어야 한다는 것이다. 즉, 매질 안에서 흡착, 이온교환, 이온용출과 같은 물리화학적 반응으로 대상용질이 아닌 다른 이온이 측정되는 전기저항치에 영향을 미칠시 식 (2)의 바탕이 되는  $\sigma_w$ -C 사이의 선형적 관계는 성립하지 않는다. 또한, 식 (2)의 사용에 있어서 유의

하여야할 점은 비연속 추적자 주입 실험의 경우  $\sigma_{max}$  값을 추가적인 실험을 통하여 구해야할 필요가 있다는 것이다. 즉, 매질의 수리분산 특성에 따라 최대상대농도가 1 이하로 발생할 수 있는 경우( $c(x,t)_{max} < 1$ ), 측정된 최소 저항치(또는  $\sigma_{max}$ )는  $C_0$ 의 농도로 포화된 흙의 전기적 특성을 나타내지 못하는 것이다. 따라서  $C_0$ 의 농도를 갖는 주입용액으로 포화된 흙에 대한 개별적인 측정을 통하여 식 (2)의  $\sigma_{max}$  값을 얻어야한다.

## 3. 실험 과정

### 3.1 실험 재료

개발된 주상실험기와 전기전도도 파과곡선의 적용성을 검증하기 위한 실내실험이 수행되었다. 흡착에 의한 용질의 지연을 배제할 수 있는 조건을 모사하기 위해 비반응성 추적자로서 염소이온( $Cl^-$ )이 사용되었다. 그림 1에서 볼 수 있듯이 추적자 용액의 전기전도도는 염소이온의 농도와 함께 선형적으로 증가함을 확인하였다. 측정된 전기전도도 값을 바탕으로 주입되는 용액의 염소이온 농도는 0.0015M-0.003M 범위를 갖도록 정하였다. 대상 매질은 표면전기전도(surface conductance)가 무시할 수 있을 정도로 작게 발생하고 Archie의 법칙(1942)이 유효한 동시에 수리학적 불균질성을 최소화하려는 목적으로 포화사질토가 사용되었다. 다양한 간극비와 입도분포 조건을 모사하고자 주문진사, 호주세사(Australian Fine Sand) 그리고 두 종류의 모래를 중량비율 1:1로 섞은 혼합사에 추적자가 주입되었다. 주문진사의 경우 흙 입자는 주로 0.025-0.09cm 사이에 분포해 있는 반면, 호주세사의 흙 입자는 주로 0.0075-0.025cm 사이에 분포해 있다(표 2 참조). 주입되는 추적자 이외에 흙에서 간극유체로 용해될 수 있는 전해질(electrolyte)이 측정되는 전기전도

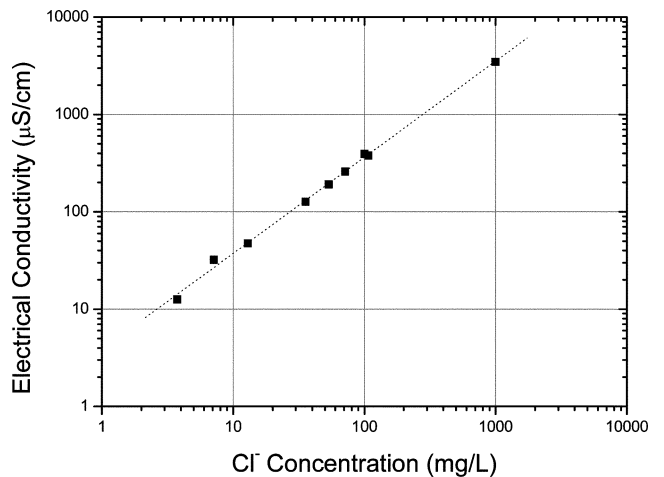


그림 1. 추적자 용액의 염소이온 농도 변화에 따른 전기전도도 변화

표 2. 사용된 시료의 물리적 특성

물성	주문진표준사	호주세사
통일분류법상 분류	SP	SP-SM
균등계수 ( $C_u$ )	1.4	2.3
곡률계수 ( $C_c$ )	0.9	1.1

도에 미치는 영향을 최소화 하고자 높은 증류수로 여러번 세척되었으며, 건조로(105°C)에서 72시간 이상 건조시킨 후 사용되었다. 준비된 시료에서 용출되는 염소이온의 농도는 검출 범위 이하(1mg/L)임을 확인하였다.

### 3.2 주상실험기 설계

본 연구에서 사용된 주상실험기는 그림 2와 같이 대상시료에 대한 전기저항 측정이 가능하도록 제작되었다. 아크릴 재질의 컬럼은 정상류 흐름을 유도하기 위해 지름과 길이의 비율(aspect ratio)이 1:2 이상 되도록 설계되었으며 785.4 cm<sup>2</sup>의 내부부피를 갖는다. 총 3조의 4-electrode 비저항센서(E1, E2, E3)가 컬럼의 내면에 부착되어 있으며, 유출구를 기준으로 5.85cm, 20.0cm, 34.15cm의 거리에서 시작연속적인 전기저항 측정이 가능하다. 일차원 흐름을 발생시키고 유입 및 유출 경계면에서 흐름의 방해가 최소화될 수 있도록 컬럼과 동일한 지름을 갖는 원형 다공관(diffuser)이 사용되었다.

전기저항을 측정하는 센서는 4개의 전극으로 구성되어 있으며 전극간격이 일정한 Wenner 배열을 이루고 있다. 센서는 다음과 같은 고려사항을 바탕으로 설계되었다.

- 측정된 전기저항치는 센서가 위치한 시료 단면의 전기적 특성을 대표하는 수치이다.
- 센서는 컬럼내 시료를 교란시키지 않는다.
- 낮은 측정 주파수에서도 분극효과(polarization effect)를 최소화한다.

이에 따라 전극은 그림 2(b)와 같이 호(arc)-형상을 갖도록 제작되었으며 한조의 센서는 흐름방향으로 1.7cm의 두께를 갖는다. 이론적으로 전류는 전극배열과 직교되는 방향으로 무한한 깊이까지 침투하지만, 실제로 대상매질이 절연체일수록 전류는 더욱 좁은 범위 내에서 흐르게 된다. 일반적으로 전류전극의 간격에 1.5배에 해당하는 깊이 내에서 80%의 전류가 흐른다고 알려져 있다(Keller and Frischknecht, 1966).

각 전극은 0.2cm의 두께를 갖는데, 이는 전극의 표면과

간극수가 충분히 맞닿아 전류의 흐름이 원활하게 이루어지도록 고려한 것이다. 전극-시료의 경계에서 전하 운반체(charge carrier)는 전극의 전자(electron)에서 간극수 내 이온으로 바뀌게 되는데, 전극 표면의 상당 부분이 (절연체로 볼 수 있는) 흙 입자에 맞닿게 된다는 점을 감안하여 간극수와 충분한 접촉면이 확보되는 전극 두께가 선정되어야 한다. 반대로 전극 두께가 커질수록 측정치는 센서가 위치한 지점(x)에서 시료 단면의 특성이 아닌 센서 주변 시료의 평균적인(volume-averaged) 특성을 대표하는 수치가 되기 때문에 본 연구에서 사용된 컬럼에서는 0.2cm의 두께가 적당하다고 판단되었다. 또한, 전극은 컬럼 내부곡면의 곡률반지름과 동일하게 절삭하여 시료와 맞닿는 면이 컬럼의 벽면과 매끄러울 수 있도록 제작하였다. 따라서 실험 중 시료 내 간극수의 흐름은 방해받지 않고 간접적인 측정이 가능하다. 측정은 1kHz의 교류 전원을 가하여 이루어졌는데, 이와 같은 4-electrode 센서는 낮은 주파수에서도 분극효과를 최소화할 수 있는 전극배열로 알려져 있다(Campanella and Weemees, 1990).

### 3.3 실험 방법

주문진사(Soil A), 호주세사(Soil B) 그리고 혼합사(Soil C)가 컬럼 내에서 일정한 다짐상태를 갖도록 다짐봉을 이용하여 채워졌다. 컬럼에 채워진 시료의 포화를 위하여 증류수(deionized water, DI water) 또는 일반 수도물이 낮은 속도(0.1ml/min)로 주입되었다. 일반적으로 이와 같은 포화 단계에서 시료 내 연결성이 부족한 간극에는 기포가 존재할 수 있어 완전포화를 가정하기 힘들게 된다. 따라서 시료의 포화 단계에 앞서 컬럼에 채워진 건조시료에는 CO<sub>2(g)</sub>가 2시간 이상 주입되었다. 이와 같은 Purging 과정은 물에 대한 높은 용해도를 갖는 CO<sub>2(g)</sub>의 특성을 활용, 기포의 발생을 최소화 시켜 흙의 완전포화를 유도한다. 시료준비 과정에서 추정된 Soil A, Soil B, Soil C의 간극비는 각각 0.656, 0.771, 0.551이었으며 이는 완전포화를 가정, 시료의 포화 전후 컬럼의 중량차를 바탕으로 얻은 수치이다. 표3은 본 연구에서 수행한 각각의 실내주상실험의 실험 조건이다. 여기서, ‘Continuous’는 유입용액을 시간에 따라 지속적으로

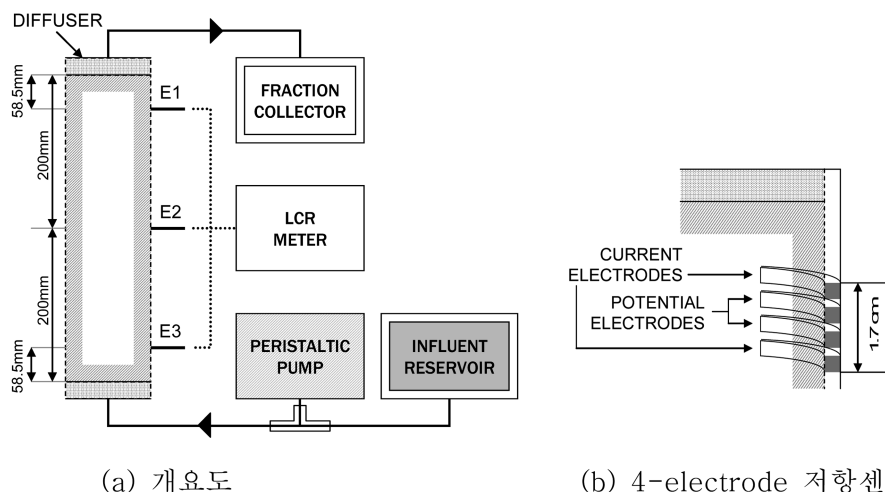


그림 2. 저항센서가 부착된 주상실험기

표 3. 실내주상실험 조건

Test No.	Test Soil	Saturating Solution	Influent Solution	Input Type	Volumetric Discharge (Q)
1	Soil A	DI Water	0.002M Cl <sup>-</sup>	Pulse	0.1ml/min
2	Soil A	DI Water	0.002M Cl <sup>-</sup>	Continuous	0.1ml/min
3	Soil A	DI Water	0.002M Cl <sup>-</sup>	Continuous	0.8ml/min
4	Soil A	0.002M Cl <sup>-</sup>	DI Water	Continuous	0.8ml/min
5	Soil A	DI Water	0.002M Cl <sup>-</sup>	Continuous	1.2ml/min
6	Soil A	0.002M Cl <sup>-</sup>	DI Water	Continuous	1.2ml/min
7	Soil B	DI Water	0.003M Cl <sup>-</sup>	Pulse	0.1ml/min
8	Soil B	DI Water	0.003M Cl <sup>-</sup>	Continuous	0.1ml/min
9	Soil B	DI Water	0.002M Cl <sup>-</sup>	Continuous	0.8ml/min
10	Soil B	DI Water	0.002M Cl <sup>-</sup>	Continuous	1.2ml/min
11	Soil C	DI Water	0.003M Cl <sup>-</sup>	Pulse	0.1ml/min
12	Soil C	DI Water	0.003M Cl <sup>-</sup>	Continuous	0.1ml/min
13	Soil C	Tap Water	0.0015M Cl <sup>-</sup>	Continuous	0.8ml/min
14	Soil C	Tap Water	0.002M Cl <sup>-</sup>	Continuous	0.8ml/min
15	Soil C	Tap Water	0.003M Cl <sup>-</sup>	Continuous	0.8ml/min
16	Soil C	DI Water	0.003M Cl <sup>-</sup>	Continuous	1.2ml/min

주입, 'Pulse'는 추적자 용액을 초기 5시간 동안 주입시킨 후 증류수를 유입하는 실험을 의미한다. E1, E2, E3의 전극은 LCR meter(4263B, Agilent사)와 연결되었으며, 식 (2)를 바탕으로 측정되는 저항 값은 용질의 상대적인 농도값으로 환산되었다. 비연속주입 실험의 경우 동일한 매질에 대해 연속주입 실험에서 얻은 값이 결과해석에 사용되었다.

전기전도도 파과곡선을 유출수 샘플링을 통하여 얻은 용질의 파과곡선과 비교해보기 위해 일정한 시간간격으로 샘플링이 이루어졌으며, 샘플은 IC(Ion Chromatography) 분석기기를 사용하여 분석하였다. 이와 같이 얻은 파과곡선은 최적 역산법에 근거한 CXTFIT코드(Toride et al., 1995)를 이용하여 표 1의 해석해(Convection Dispersion Equation)를 바탕으로 분석되었으며, 평균간극유속(, average pore-water velocity)과 종분산계수(longitudinal dispersion coefficient)가 추정되었다.

#### 4. 결과 및 분석

##### 4.1 전기전도도 파과곡선

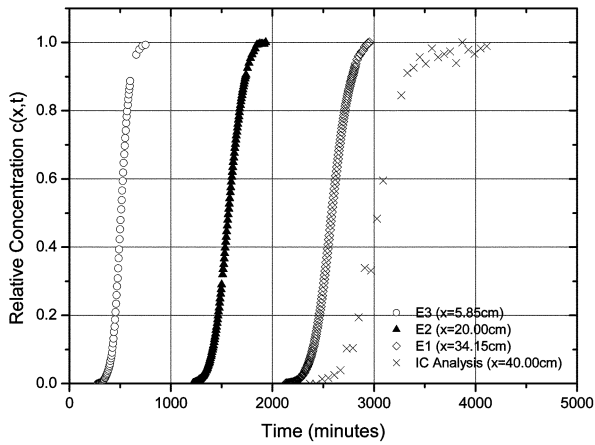
유입조건에 따라 나타나는 대표적인 전기전도도 파과곡선과 추적자 농도 파과곡선을 그림 3에 나타내었다. 실험결과를 용질의 상대농도 변화를  $PV(\text{Pore Volume}, PV=v_x t/L)$  시간 개념으로 나타내는 것이 일반적이나 본 연구에서는 위치별로 얻은 여러개의 파과곡선을 같이 나타내기 위해 용질의 상대농도 변화를 시간( $t$ ) 축에 나타내었다. 시료의 간극비와 컬럼의 부피를 기준으로 유량에 따라 컬럼 내 위치별  $PV$ 는 추정가능하다. 예를 들어 유출구 기준으로( $x=L$ ) 실험1-2는 3,110분, 실험6은 259분, 그리고 실험11-12는 3,420분이  $1PV$ 에 해당하는 시간이다(그림 3 참조). 전기전도도 측정을 통해 얻은 농도이력은 샘플링을 통해 얻은 유출수의 농도이력과 같이 용질이 겪게 되는 역학적인 분산과 분자확산 작

용에 의하여 매끄러운 곡선의 형태로 나타났다는 것을 알 수 있다. 용질의 파과는 전극의 배치순서로 나타났으며(E3 → E2 → E1) Pulse 주입의 경우(그림 3(c)) 세 전극 모두 상대농도치가 1 이하로 발생하였다. 이러한 경향은 Soil A와 Soil B에서도 나타났으며 이를 통하여 모든 흡에서 역학적인 분산이 용질의 흐름에 지배적인 영향을 미쳤음을 알 수 있었다.

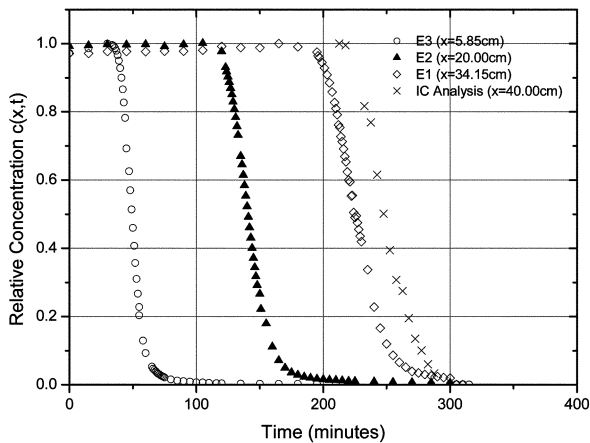
전기전도도 파과곡선은 유출수 분석으로 얻은 파과곡선에 비해 상대적으로 매우 연속적인 상대농도치를 나타냄을 알 수 있다. 전기저항 측정의 가장 큰 장점은 시간연속적으로 측정이 가능하다는 것이며, 측정은 순간적으로 이루어지기 때문에 용질의 이동을 보다 상세하게 추정해볼 수 있다. 그림 3은 3조의 센서에서 1분-15분 범위 내의 시간 간격으로 이루어진 측정결과를 나타내고 있으나, 필요시 이보다 더 짧은 간격으로 연속적인 측정이 가능하다는 것이다. 이는 기존의 화학적 분석 기법이 갖는 한계를 보완할 수 있을 것으로 사료된다. 화학적 분석은 대부분 일정량 이상의 유출수 용액을 요하기 때문에 연속적인 상대농도를 해석하는데에는 한계가 있다. 용질의 농도변화가 단시간 내에 일어나는 가속화 실험에서 전기저항 측정을 활용한 용질의 수리분산 특성 해석은 매우 효과적일 것으로 판단된다.

##### 4.2 이동계수 산정

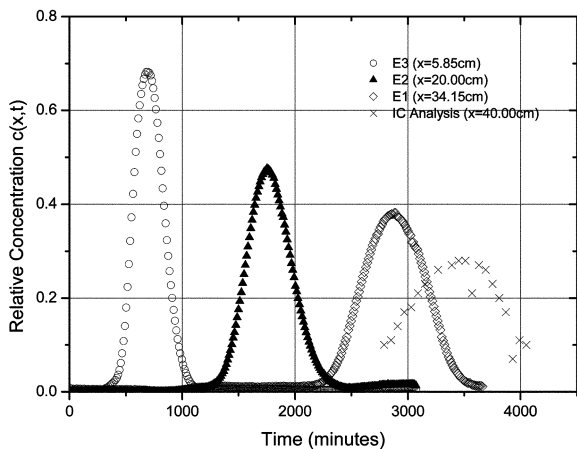
저항측정과 유출수 샘플 분석을 통해 얻은 상대농도이력을 해석해에 대입함으로써 추정된 평균간극유속과 종분산계수를 그림 4-5에 나타내었다. 단일 실험에서 얻은 3개의 전기전도도 파과곡선은 측정 위치에 따른 영향을 알아보기 위하여 개별적인 회기분석이 이루어졌다. 전기전도도 파과곡선의 경우 회기분석은 표 1의 (실제농도를 바탕으로한) 해석해로 이루어졌으며 매우 높은 결정계수( $R^2$ )를 보였다(>0.95). 유출수 샘플 분석을 통해 얻은 파과곡선은 플럭스 평균농도 개념을



(a) 실험 No.2 (주문진사, Continuous Input, Q=0.1ml/min)



(b) 실험 No.6 (주문진사, Continuous Input, Q=1.2ml/min)



(c) 실험 No.11 (혼합사, Pulse Input, Q=0.1ml/min)

그림 3. 전기전도도(E1, E2, E3) 및 추적자 농도(IC Analysis) 파과곡선

바탕으로 제시된 해석해(Kreft and Zuber, 1978; van Genuchten and Parker, 1984)를 사용해 분석이 이루어졌다. 비저항센서를 활용한 측정기법의 적용성을 평가하고자 전기전도도 파과곡선에서 얻은 이동계수는 (동일 실험의) 유출수 파과곡선에서 추정된 이동계수 값으로 나눈 상대적인 값으로 표현되었다.

그림 4와 같이 전기전도도 파과곡선은 유입경계 부근(E3)에서 상대적으로 낮은 평균간극유속을 예측한 반면, 유입경계와 떨어진 위치(E2와 E1)에서는 유출수 파과곡선의 추정치와 비슷한 값을 보였다. 이러한 경향은 (단일 실험에서)

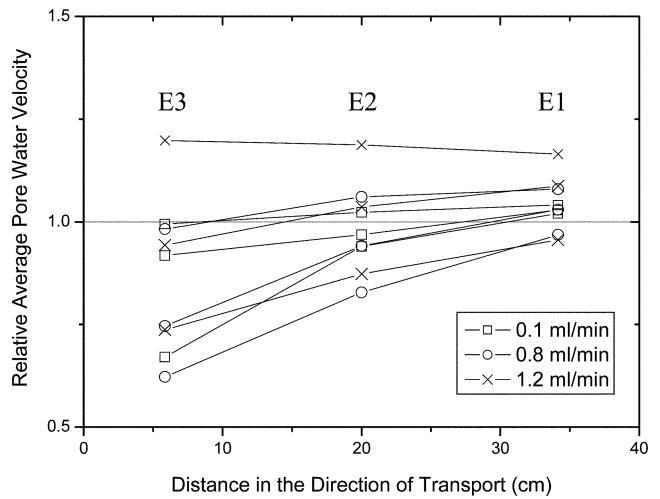


그림 4. 전기전도도 파과곡선에서 얻은 평균간극유속 (유출수 파과곡선에서 얻은 평균간극유속으로 나눈 상대값)

위치별로 얻은 3개의 추정치를 연결시킨 직선의 형태를 볼 때 거의 모든 실험에서 나타났음을 알 수 있다. 반면 흙의 종류와 유량에 따른 영향은 없는 것으로 나타났다. 본 연구에서 수행된 수상실험에서는 연동식 펌프가 사용되었기 때문에 준비된 컬럼의 유입경계로 일정한 유량이 유지되었다. 따라서 흐름방향의 간극유속( $v_x$ )은 매질이 균질하다고 가정할시 이론적으로 모든 위치에서 일정하게 나타나야한다. 실험에서 사용된 모든 흙은 매우 좁은 입도분포를 갖는 모래로, 균등계수( $C_u$ ) 또한 1.4(Soil A)와 2.3(Soil B)로 매우 낮다. 따라서 그림 4에 나타난 위치별 평균간극유속의 변화 양상은 준비된 매질의 불균질성으로 이해하기엔 무리가 있다. 유입경계 부근에서 추정된 낮은 평균간극유속은 센서의 기하학적인 구조에 기인한 부정확성으로 판단된다. 해석과정에 있어서 농도이력은 특정위치(x)에서 얻은 결과로 인식되지만, 사용된 센서는 Non-Point 센서로서 일정한 두께를 가진다. 즉, 흐름방향으로 1.7cm의 두께를 갖는 센서의 중심지점을 절대적인 농도이력 측정지점으로 판단할 수는 없는 것이다. 이러한 영향을 최소화하기 위해선 저항 측정을 유출경계 부근에서 수행해야 될 것으로 사료된다. 유출경계(E1)에서는 저항 측정을 통하여 0.96-1.16 범위 내에서 신뢰성 높은 평균간극유속이 추정되었다.

중분산계수의 경우 전기전도도 파과곡선은 유출수 파과곡선에서 산정된 수치대비 0.40-1.86배에 이르는 값을 산정한 것으로 확인되었다. 센서의 위치, 흙의 종류와 유량에 따른 경향성은 뚜렷하게 나타나지 않았다. 단일 실험에서 얻은 3개의 추정치를 연결시킨 직선의 형태를 분석해보면, 위치별 추정치의 편차는 크지 않았다는 것을 알 수 있다. 평균적으로 단일 실험에서 얻은 위치별 중분산계수 추정치의 표준편차는 0.267로 비교적 좁은 범위 내에 있었다. 파과곡선에서 추정되는 중분산계수는 거시적인 차원에서 흐름에 영향을 미치는 수리분산특성에 의하여 매우 민감하게 변하는 인자이다. 실제로 동일한 흙과 유량에서 수행된 두 번의 실험에서 (e.g. Test No.3/4, Test No.5/6) 유출수 파과곡선을 통해 얻은 중분산계수 또한 최대 21.3%의 편차를 보였다. 따라서 중분산계수는 저항측정을 통해 컬럼내 모든 위치에서 매우 효과적으로 추정되는 것으로 판단된다. 그림 6은 전기전도도

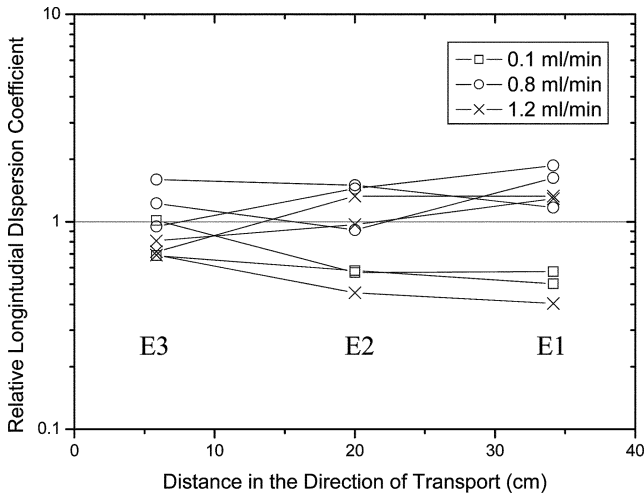


그림 5. 전극별 전기전도도 파과곡선에서 얻은 종분산계수 (유출수 파과곡선에서 얻은 종분산계수로 나눈 상대값)

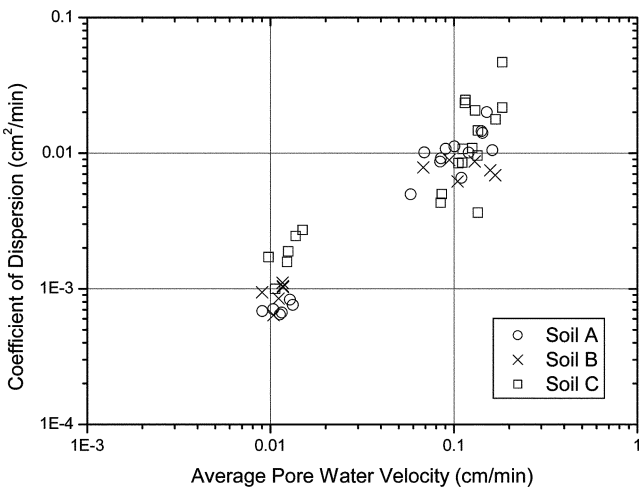


그림 6. 전기전도도 파과곡선에서 추정된 평균 간극유속과 종분산계수의 관계

파과곡선에서 얻은 종분산계수와 평균간극유속의 선형적인 관계를 보여주는데, 본 연구에서 수행된 모든 실험에서 역학적인 분산이 용질의 이동에 지배적인 영향을 미쳤다는 것을 확인할 수 있다.

#### 4.3 추적자 용액 대 포화용액의 상대전기전도도 비율(K)

전기전도도 파과곡선은 유입용액과 매질 내 포화용액의 전도성 차이를 측정된 저항 값으로 감지하여 이를 상대적으로 표현한 곡선이다. 따라서 포화용액과 유입용액의 전도성 차이가 존재한다는 조건이 성립되어야 농도이력곡선을 얻을 수 있다. 물론 간극수 내 전기중성(electroneutrality)원리와 용해되어있는 이온들의 개별적인 이온전기전도도(ionic conductivity)를 바탕으로 특정 이온의 농도이력을 추정해볼 수 있으나, 이를 위해선 추가적으로 많은 가정이 요구된다. 유출용액의 전기전도도 변화로 개별적인 이온의 파과를 추정해본 Shackelford 등(1999)의 경우, 신뢰도 높은 해석을 위해선 유입용액과 포화용액 사이에 충분한 전기전도도 차이가 필요하다고 제시한바 있다. 본 연구에서는 유입용액 대 포화용액의 전기전도도 비율로 정의하고, 동일한 조건에서 값을 변화시켜가며 나타나는 전기전도도 파과곡선의 형

태를 분석해 보았다. 즉, 수돗물( $\sigma_{WATER}=156\mu S/cm$ )로 포화된 흡에 0.003M  $Cl^-$  추적자 용액( $\sigma_{Cl}=388\mu S/cm$ )이 주입되는 실험 15(표 3 참조)의 경우,  $K$ 값은 약 2.49( $=\sigma_{Cl}/\sigma_{WATER}$ )이 되는 것이다. 낮은  $K$ 값을 갖는 실험조건을 만들기 위해 포화용액으로 증류수 대신 상당한 전도성을 띄는 수돗물이 사용되었으며, 추적자의 농도는 0.0015M까지 낮추었다. 물론, 유출수 샘플의 화학적 분석을 통해 얻은 파과곡선은 수돗물 내에 존재하는 염소 이온의 농도를 고려하여 이루어졌다.

전기전도도 파과곡선에 미치는  $K$ 값의 영향을 그림 7과 같이 나타내었다. 비교분석을 위하여 동일한 위치의 센서(E2)에서 얻은 여러개의 전기전도도 파과곡선을 PV시간개념으로 도시하였다. 그 결과 상대적으로 높은  $K$ 값에서는 매끄러운 파과곡선이 나타나는 반면, 낮은  $K$ 값에서는 파과( $c(t)=1$ )이후 상대농도가 유지되지 않고 감소하는 현상이 발생함을 확인하였다. 즉, 측정되는 흡의 전기전도도가 최대값( $\sigma_{max}$ )을 갖은 후 이보다 작은 값으로 수렴한다는 것이다. 이러한 경향은  $K$ 값이 감소할수록 더 명확하게 나타났으며, 그림 7에는 도시되어있지 않으나 E1과 E3센서에서도 확인되었다. 물론 파과가 발생하기 이전까지의 전기전도도 파과곡선은  $K$ 값에 상관없이 비슷한 증가형태를 보였으며, 이를 바탕으로 추정된 평균간극유속과 종분산계수는 큰 차이를 나타내지 않았다. 이와 같은 저항치의 변화는 전기적 특성이 다른 두 매질 사이에서 측정이 이루어질 때 발생하는 측정 오차로 판단된다. 전기전도도가 다른 두 매질( $\sigma_{HIGH}$ ,  $\sigma_{LOW}$ )의 경계에 4개의 전극으로 이루어진 센서가 수직인 방향으로 움직이는 경우 두 매질의 전기전도도보다 더 크거나 작은 값이 측정될 수 있는데( $\sigma_{measured} > \sigma_{HIGH}$  또는  $\sigma_{measured} < \sigma_{LOW}$ ), 이와 같은 측정 오차는 낮은  $K$ 값의 실험조건에서 지나치게 높은  $\sigma_{max}$ 값을 선정하게 되는 원인으로 작용할 수 있다. 결과적으로, 비반응성 추적자 용액을 사용해 주상실험을 통해 전기전도도 파과곡선을 바탕으로 매질의 수리분산특성을 알아보자는 경우, 상대적으로 높은 농도의 추적자 용액이 주입되어야 한다고 판단된다. 특히, 세척이 안된 흡 매질의 경우 포화 단계에서 간극수로 용출되는 전해질로 인하여  $\sigma_{min}$ 값이 상당히 높을 수 있는 만큼, 절대적인 추적자 농도 기준이 아닌 2.5 이상의 적절한  $K$ 값이 선정되어야 한다.

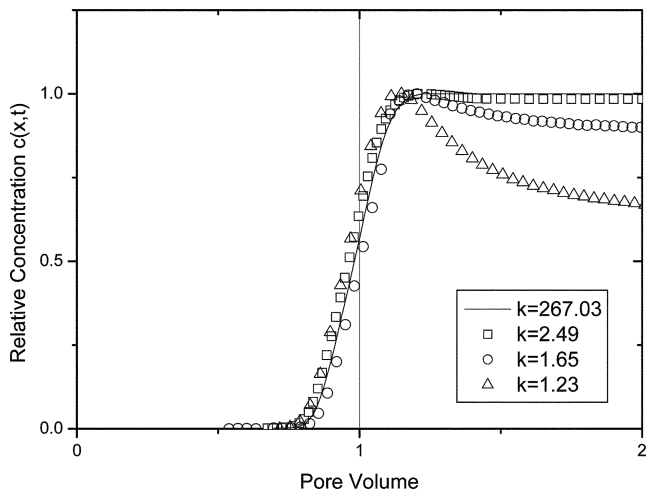


그림 7. 값의 차이에 따라 나타나는 전기전도도 파과곡선의 형태

## 5. 결 론

본 연구에서는 3조의 전기저항 센서가 장착된 주상실험기를 개발하여 신속하고 간편하게 용질의 수리분산 특성을 규명할 수 있는 새로운 방법을 제안하였다. 비반응성 추적자 용액을 활용하여 주상실험을 수행한 결과 전기전도도 파과곡선은 용질의 플러스-평균농도이력이 아닌 실제농도이력을 시간연속적으로 추정할 수 있음을 확인하였다. 추적자의 연속주입 뿐만이 아니라 비연속주입 실험에서도 농도이력을 효과적으로 나타낼 수 있었으며, 전제된 사이의 비례조건이 성립할 시 전기저항 센서의 활용은 많은 시간과 노력이 요구되는 용출수 샘플링과 분석을 대체할 수 있을 것으로 판단되었다. 전기전도도 파과곡선을 통해 추정된 농도이력을 바탕으로 수리분산계수와 값을 산정해본 결과, 신뢰성이 가장 높은 결과를 얻기 위해선 측정이 유출경계 부근에서 이루어져야함을 확인하였다. 또한, 측정 오차를 줄이기 위해서 주입되는 추적자 용액은 포화간극수에 비해 전기전도도가 2.5 배 이상 크도록 농도에 대한 고려가 이루어져야 한다.

## 감사의 글

본 연구는 서울대학교 SIR BK21 (안전하고 지속가능한 사회기반건설사업단)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

## 참고문헌

유동주, 오명학, 김용성, 박준범(2006) 벤토나이트 슬러리의 전기적 특성에 대한 영향인자 분석. *한국지반공학학회논문집*, 한국지반공학회, Vol. 22, No. 10, pp. 21-32.

Aggelopoulos C.A. and Tsakiroglou C.D. (2007) The longitudinal dispersion coefficient of soils as related to the variability of local permeability. *Water Air Soil Pollution*, Vol. 185, pp. 223-237.

Archie G.E. (1942) The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Trans. AIME*, Vol. 146, pp. 54-62.

Campanella, R.G. and Weemee, I. (1990) Development and use of an electrical resistivity cone for groundwater contamination studies. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 27, pp. 557-567.

Folkes, D.J. (1982) Fifth Canadian Geotechnical Colloquium: Control of contaminant migration by the use of liners. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 19, pp. 320-344.

Freeze, R.A. and Cherry, J.A. (1979) *Groundwater*. Prentice Hall Inc.

Keller, G.V. and Frischknecht, F.C. (1966) *Electrical Methods in Geophysical Prospecting*. Pergamon Press.

Klein, K. (1999) *Electromagnetic properties of high specific surface minerals*. Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, Georgia Institute of Technology, USA.

Kumar, P.R. and Singh, D.N. (2005) A novel technique for monitoring contaminant transport through soils. *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol. 109, pp. 147-160.

Kreft, A. and Zuber, A. (1978) On the physical meaning of the dispersion equation and its solutions for different initial and boundary conditions. *Chemical Engineering Science*, Vol. 33, pp. 1471-1480.

Mackay, D.M., Roberts, P.V., and Cherry, J.A. (1985) Transport of organic contaminants in groundwater. *Environmental Science and Technology*, Vol. 19, No. 5, pp. 384-392.

Maraq, M.A. (2001) Effects of fundamental differences between batch and miscible displacement techniques on sorption distribution coefficient. *Environmental Geology*, Vol. 41, pp. 219-228.

Persson, M., Berndtsson, R., Nasri, S., Albergel, J., Zante, P., and Yumegaki, Y. (2000) Solute transport and water content measurements in clay soils using time domain reflectivity. *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 45, No. 6, pp. 833-847.

Pinder, G.F. (1984) Groundwater contaminant transport modeling. *Environmental Science and Technology*, Vol. 18, No. 4, pp. 108A-114A.

Reiger, P.H. (1987) *Electrochemistry*. Prentice Hall Inc.

Rowe, R.K. (1988) Eleventh Canadian Geotechnical Colloquium: Contaminant migration through groundwater - the role of modeling in the design of barriers. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 25, pp. 778-798.

Rowe, R.K. and Booker, J.R. (1985) 1-D pollutant migration in soils of finite depth. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol. 111, No. 4, pp. 479-499.

Santamarina, J.C. (2001) *Soils and Waves*, John Wiley & Sons.

Shackelford, C.D. (1994) Critical concepts for column testing. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 120, No. 10, pp. 1804-1828.

Shackelford, C.D., Malusis, M.A., Majeski, M.J., and Stern, R.T. (1999) Electrical Conductivity Breakthrough Curves. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*. Vol. 125, No. 4, pp. 260-270.

Shackelford, C.D. and Redmond, P.L. (1995) Solute breakthrough curves for processed kaolin at low flow rates. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 121, No. 1, pp. 17-31.

Singh, K.S. (2006) Estimating dispersivity and injected mass from breakthrough curve due to instantaneous source. *Journal of Hydrology*, Vol. 329, pp. 685-691.

Toride, N., Leij, F.J., and van Genuchten, M. Th. (1995) *The CXT-FIT code for estimating transport parameters from laboratory or field tracer experiments*. Research Report No. 137, US Salinity Laboratory, USDA, CA.

Yang, H., Rahardjo, H., Wibawa, B., and Leong, E. (2004) A soil column apparatus for laboratory infiltration study. *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 27, No. 4, pp. 1-9.

van Genuchten, M. Th. and Parker, J.C. (1984) Boundary conditions for displacement experiments through short laboratory soil columns. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 48, pp. 703-708.

van Genuchten, M. Th. and Wierenga, P.J. (1986) *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. Agronomy Monographs.

(접수일: 2008.3.25/심사일: 2008.4.28/심사완료일: 2008.6.4)