

# TDR(Time Domain Reflectometry)를 이용한 비포화 토양에서 천이상태의 오염원 이송확산 특성에 관한 연구 : (2) 적용

## Study on Characteristics of Transient Solute Transport in the Vadose Zone by Using TDR: (2) Application

박 재 현\* / 서 일 원\*\* / 선 우 중 호\*\*\*  
Park, Jae Hyeon / Seo, Il Won / Sonu, Jung Ho

### Abstract

In this study, a 1-D laboratory experiment was conducted to investigate the characteristics of transient unsaturated solute transport by using two kinds of soils of which properties were known by test. Especially the TDR method which is proposed in this study was used to measure water content and solute concentration.

As results, in the transient flow, the wetting front moves down rapidly, and the distribution of solute concentration near the wetting front showed the similar type of the water content distribution(semi-bell type). A numerical model HYDRUS was used to compare with the experimental results. Numerical results for the water movement are similar to experimental results. However, numerical results of the distribution of solute concentration are more scattered than experimental results. It means that measured dispersivity, numerical dispersion, adsorption coefficient, and soil sample size etc. should be considered in order to determine the dispersivity used in the numerical model. The present measuring method was proved to be superior to other formula and to be an available method to apply to solute transport test. The measuring error of the developed method is estimated smaller than 10% while water content is larger than 0.15.

**Keywords:** Transient Solute Transport, TDR, Vadose Zone, Unsaturated Flow

### 요 지

본 연구에서는 천이상태의 비포화 오염원 이송확산 특성을 분석하기 위하여 토양의 물리, 화학적 특성을 알고 있는 두 종류의 현상토양(SUS, KUS)을 이용하여 1차원 실내실험을 수행하였는데, 천이상태의 토양내 함수량과 오염원의 농도를 측정하기 위하여 본 연구에서 개발한 TDR을 이용한 농도측정법을 이용하였으며, 질량평형을 이용하여 측정방법의 정정도 분석하였다.

실험결과에 의하면 급격한 습윤전선의 전진에 따른 鐘形의 함수량 변화를 관측할 수 있었고, 이때 오염원의 이송확산은 습윤전선을 추월하지 않으면서 농도 천이구간의 중심점으로부터 전방영역의 농도분포가 습윤전선에서의 함수량 분포와 유사한 종형을 이루고 있음을 관측할 수 있었다. 본 연구에서 제안한 측정법을 적용한 결과 함수량이 0.15이상일 경우 매우 좋은 결과를 보였으며, 측정오차를 검토한 결과 10%이하의 오차율을 보였다. 따라서 본 논문에서 개발된 천이상태의 오염원 농도 측정법은 기존의 방법에 비하여 정확하고 적용이 용이한 측정방법으로 판단된다. 수치모형 HYDRUS를 수행한 수치결과와 실험결과를 비교하였는데, 비포화 흐름특성은 실험결과와 수치결과가 일치하고 있으나, 오염원 이송확산 특성은 수치결과가 실험결과보다 더 많이 확산되는 경향을 보였다. 따라서 수치모형을 현장에 적용할 경우 수치모형에 적용할 확산지수는 BTC 실험을 통하여 측정된 확산지수, 수치확산, 흡착계수, 적용영역의 크기 등을 고려하여 결정하여야 할 것으로 판단된다.

**핵심용어 :** 천이 비포화 오염원 이송확산, TDR, 비포화대, 비포화흐름

\* 서울대학교 공학연구소 특별연구원  
Special Researcher, Research Institute of Eng. Sci., Seoul National University, San 56 1, Shillim dong, Kwanak gu, Seoul 151 742, Korea

\*\* 서울대학교 토목공학과  
Assoc. Prof., Dept. of Civil Eng., Seoul National University, San 56 1, Shillim dong, Kwanak gu, Seoul 151 742, Korea

\*\*\* 서울대학교 토목공학과  
Prof., Dept. of Civil Eng., Seoul National University, San 56 1, Shillim dong, Kwanak gu, Seoul 151 742, Korea

## 1. 개요

토양표면에 누출된 오염물질은 비포화대를 거쳐 포화대로 전이되며, 일단 포화대에 전이된 오염원은 지하수흐름을 따라 빠른 속도로 확산되어 지하수를 오염시키게 되므로 오염원의 통로가 되는 비포화대에서의 오염원이송영역을 추정하는 것은 시간에 따른 오염된 토양영역 예측뿐만 아니라 오염원의 지하수내 초기확산영역을 예측하는 중요한 자료가 된다. 특히 이러한 오염원은 천이흐름 특성을 보이기 때문에 천이상태의 비포화 오염원 이송확산 특성은 지하수 오염원의 거동을 예측하는 중요한 요소가 된다. 그럼에도 불구하고 비포화 토양에서의 이송확산은 시간과 공간에 따른 함수량의 변화와 토양수를 매개로 하는 오염원의 이송, 확산이라는 두 가지 특성을 동시에 측정해야 하기 때문에 천이상태의 오염원 이송확산을 측정하는 것은 매우 어려운 것으로 알려져 있다. 수치모형을 개발할 경우 검증에 위한 실험자료가 부족하기 때문에 적절한 한계조건을 가진 해석해를 이용하여 개발된 수치모형을 검증하고는 있으나, 해석해가 가지는 적용의 한계로 인하여 다양한 경우에 대한 수치해의 적용성에는 항상 문제를 안고 있는 것이 현실적이다.

본 연구에서는 이러한 비포화 오염원의 이송확산 특성을 분석하기 위하여 두 종류의 현장토양을 이용한 실내실험을 수행하였는데, 본 연구에서는 TDR을 이용하여 토양내 함수량과 오염원의 농도를 동시에 측정하는 방법을 제안하였다. TDR을 이용하여 정상상태의 오염원 농도를 측정하는 연구는 국외 뿐 아니라 국내에서도 여러 연구자들에 의하여 수행되어 왔으나 (Elrick 등, 1992; Kachanoski 등, 1992; Wraith 등, 1993; Ward 등, 1994; Kim, 1996), 천이상태의 오염원농도를 측정하는 연구는 거의 없는 실정이다. 본 연구에서 사용한 방법은 오염원의 시간, 공간적 농도변화를 측정하기 위하여 박재현 등(1999)이 제안한 TDR을 이용한 함수량과 상대전기전도도의 관계를 이용하였고, 실제 오염원의 농도추정을 위한 방법을 제안하였다. 본 연구에서 사용된 방법의 적용성을 검토하기 위하여 측정 정밀도뿐만 아니라 실험결과를 토대로 천이상태의 비포화 오염원 이송특성을 수치모형과 비교 분석하였다.

## 2. 수학적 모형

비포화 토양에서 오염원의 이송확산을 분석하기 위

한 수학적 모형은 비포화 흐름을 해석하기 위한 Richards 방정식과 오염원의 이송확산을 해석하기 위한 이송확산 방정식 등 두 방정식으로 구성된다. Richards 방정식을 모세관 압력수두가 종속변수인 식으로 표시하면 식 (1)과 같다.

$$C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} \left( K(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) - \frac{\partial K(\psi)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

여기서  $C(\psi) (= d\theta/d\psi)$ 는 단위 모세관 압력수두 변화에 의한 함수량의 변화를 나타내는 함수보유능력 (water capacity),  $\psi$ 는 모세관 압력수두,  $K(\psi)$ 는 비포화 투수계수,  $t$ 는 시간,  $z$ 는 연직 하방향의 깊이를 의미한다. 비포화 투수계수는 함수량에 대하여 비선형거동을 하는데, 포화투수계수와 불보유함수를 이용하여 비포화 투수계수를 추정하는 것이 일반적이며, 물보유함수는 토양이 가지는 고유한 특성으로 실험을 통하여 측정하게 된다. 또한 오염원 이송에 관한 지배방정식으로는 전통적인 이송확산 방정식(convection dispersion equation; CDE)을 이용하는데, 비포화 토양에서 이송확산 방정식에는 함수량이 새로운 변수로 추가되며 식 (2)와 같다.

$$\frac{\partial(R\theta c)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \theta D_L \frac{\partial c}{\partial z} \right) - \frac{\partial(v_L \theta c)}{\partial z} - \lambda R \theta c \quad (2)$$

여기서  $R$ 은 지체인자(retardation factor)로 토양의 흡착특성에 의하여 영향을 받는다.  $\lambda$ 는 오염원의 감쇠상수(decay constant),  $c$ 는 오염원의 농도,  $v_L$ 은 흐름방향의 공극수 유속(pore water velocity)을 나타내며,  $D_L$ 는 흐름방향의 동수역학적 이송확산계수(coefficient of hydrodynamic dispersion)를 의미한다. 1차원 상에서의 동수역학적 이송확산계수는 식 (3)과 같이 정의된다.

$$D_L = \alpha_L \bar{v} + D^* \quad (3)$$

여기서  $\alpha_L$ 은 흐름방향의 분산지수(longitudinal dispersivity),  $\bar{v}$ 는 흐름방향의 평균 공극유속,  $D^*$ 는 분자확산계수(molecular diffusion coefficient)이다. 식 (2)를 이용하기 위해서는 분산지수, 지체인자를 결정할 자료가 필요한데, 이 값들은 토양의 종류에 따

라 달라지므로 각 토양별 특성을 실험을 통하여 추정하여야 한다. 이와 같이 천이상태의 흐름장내의 오염원 농도의 이송특성을 추정하는 연구를 수행하기 위해서는 토양시료 내에서 함수량과 오염원의 시간, 공간적 변화 특성을 측정할 뿐 아니라 토양의 물보유함수, 포화투수계수, 분산지수, 흡탈착계수 등 각 토양의 물리적 특성을 별도의 실내실험을 통하여 조사하여야 한다. 이를 위해서 본 연구에서는 실험에 사용한 각 토양의 물리적 특성을 측정하는 실험과 1차원 토양가동 시료를 통하여 시간, 공간에 따른 오염원의 농도분포를 측정하는 실험을 함께 수행하였다. 또한 측정된 천이상태의 비포화 오염원 이송특성과 비교, 분석하기 위하여 수치실험을 수행하였으며, 특히 수치해결 현장에 적용할 경우 사용하는 매개변수들의 적용성을 살펴보았다. 본 연구에서 사용한 수치모형은 Kool과 van Genuchten(1992)이 개발한 HYDRUS인데, HYDRUS는 선형 보간함수를 이용한 Galerkin방법을 이용하여 지배방정식을 유한요소화한 수치모형이다.

### 3. TDR을 이용한 비포화오염원 농도측정법

오염원의 시간, 공간적 농도변화를 측정하기 위하여 박재현 등(1999)이 제안한 방법은 TDR의 반향과의 특성과 총토양전기전도도의 관계를 이용하며, 특히 한계함수량의 개념을 도입하여 함수량에 따른 총전기전도도의 관계를 식 (4)와 같이 제안 하였다.

$$\sigma_a = \sigma_{sat}(a\theta + b) \quad \theta_{cr} \leq \theta \leq \theta_s \quad (4a)$$

$$\sigma_a = \sigma_{sat} \left( \frac{\theta}{\theta_{cr}} \right)^m (a\theta_{cr} + b) \quad 0 < \theta < \theta_{cr} \quad (4b)$$

여기서  $\sigma_a$ 는 총전기전도도,  $\sigma_{sat}$ 은 포화상태의 총전기전도도,  $\theta_{cr}$ 은 한계함수량,  $a, b, m$ 은 경험상수이다. 본 연구에서는 이러한 관계를 기초로 하여 천이상태의 오염원 농도  $c(\theta)$ 를 측정할 수 있는 식을 (5)와 같이 정리하였다. 이 때 총전기전도도와 토양수의 농도의 관계는 Kachanoski 등(1992)이 제안한 선형관계를 적용하였다. 식 (5)는 일정한 함수량에 대한 토양수 농도와 총전기전도도의 관계를 나타내는 두 점 ( $0, \sigma_{a,0}(\theta)$ ), ( $60, \sigma_{a,60}(\theta)$ )을 연결하는 직선방정식이다.

$$c(\theta) = \frac{60}{(\sigma_{a,60}(\theta) - \sigma_{a,0}(\theta))} \{ \sigma_a(\theta) - \sigma_{a,60}(\theta) \} + 60 \quad (5)$$

여기서, 함수량이 한계함수량보다 클 경우 ( $\theta \geq \theta_{cr}$ ),  $\sigma_{a,0}(\theta)$ ,  $\sigma_{a,60}(\theta)$ 은 식 (6)과 같으며, 작을 경우 ( $\theta < \theta_{cr}$ )에는 식 (7)과 같다.

$$\sigma_{a,0}(\theta) = \sigma_{sat,0}(a_0\theta + b_0) \quad (6a)$$

$$\sigma_{a,60}(\theta) = \sigma_{sat,60}(a_{60}\theta + b_{60}) \quad (6b)$$

$$\sigma_{a,0}(\theta) = (\theta/\theta_{cr})^{m_1} \sigma_{sat,0}(a_0\theta_{cr} + b_0) \quad (7a)$$

$$\sigma_{a,60}(\theta) = (\theta/\theta_{cr})^{m_2} \sigma_{sat,60}(a_{60}\theta_{cr} + b_{60}) \quad (7b)$$

여기서,  $a_0, b_0$ 는 농도가 0 meq/L일 경우 ( $\theta_s, 1$ )을 지나는 함수량과 상대전기전도도의 선형관계식의 기울기 및 절편 값에 해당한다.  $a_{60}, b_{60}$ 은 농도가 60 meq/L일 경우의 기울기와 절편 값이다. 함수량에 따른 오염원의 농도산정을 위한 식 (6), (7)의 계수들을 실험을 통하여 추정하였는데, Table 1은 포화함수량에서 농도에 따른 SUS, KUS시료의 총전기전도도 값을 나타내며 Table 2는 선형영역에서 추정된 각 농도별

Table 1. Bulk Soil Electrical Conductivity at Saturated Water Content for Three Concentration

Soil Sample	$\sigma_{a,0}$	$\sigma_{a,30}$	$\sigma_{a,60}$
SUS	0.1031	0.1962	0.2886
KUS	0.1522	0.2360	0.3558

Table 2. Estimated Slope and Intercept in the Linear Zone

Soil Sample	Concentration (meq/L)	Parameter	
		a	b
SUS	0	2.6754	0.013
	30	2.6848	0.0149
	60	2.9587	0.1184
KUS	0	2.5614	0.1603
	30	2.4667	0.1174
	60	2.7104	0.2278

기울기와 절편 값이다. 즉, Table 1에 제시된 농도별 포화 충전기전도도와 예비실험을 통하여 확보된 Table 2와 같은 계수를 식 (5)와 (6)에 대입하면 함수량에 따른 충전기전도도를 계산할 수 있으며, 이 값을 식 (5)에 대입하면 함수량에 따른 오염원의 농도를 구할 수 있다.

#### 4. 실험시료 및 실험방법

TDR을 이용한 비포화 오염원 이송확산 실험결과의 분석과 실험영역에 대해 수치해법을 적용하기 위하여 실험시료의 토양특성(포화함수량, 포화투수계수, 물보유함수, 건조체적밀도, 분산지수, 흡착계수)을 알고있어야 한다. 본 연구에서는 2종류의 현장토양(SUS, KUS)을 사용하였는데, 실내실험에 적합한 시료를 구성하기 위하여 현장에서 채취한 토양 중 우선 5 mm 크기 이상의 자갈을 분리한 후 이를 자연건조시켜 사용하였다. 실험에 사용한 토양시료를 체분석한 결과 KUS 시료는 실트(silt)가 10%, 세사(fine sand)가 22%, 조사(coarse sand)가 68%로 국제토양학회법이나 미국농부부의 토성분류법(삼각도표법)을 이용하여 분류한 토성은 砂土(sand, S)와壤質砂土(loamy sand, LS) 사이에 해당되며, SUS 시료는 微砂가 4%, 細砂가 8%, 粗砂가 88%로 砂土에 해당한다. 포화함수량, 잔유함수량, 포화투수계수, 건조밀도 등은 Table 3과 같다. 일반적으로 이들 자료와 물보유함수를 이용하여 비포화투수계수를 추정하는데, 본 연구에서는 물보유함수를 추정하기 위하여 체적기압판(volumetric pressure plate extractor)을 이용하였다. 물보유함수를 추정하는 식은 여러 연구자들에 의하여 제안되었는데, 본 연구에서는 van Genuchten(1980)이 제안한 식을 사용

하였다. 유효포화도(S)에 관하여 정리한 물보유함수는 다음 식 (8)과 같으며, 마름과정, 젖음과정에 관한 매개변수  $\alpha, n$  을 추정한 결과는 Table 3과 같다.

$$S = \frac{1}{(1 + |\alpha\psi|^n)^{1/n}}, \quad l = 1 - \frac{1}{n} \quad (8)$$

평형농도와 흡착제에 흡착된 오염원양과의 관계는 흡착등온(adsorption isotherm)으로 표시하는데, 식 (9)는 가장 일반적으로 사용되는 Freundlich 흡착등온식이다.

$$\frac{x}{m_{ad}} = X = kc_e^\eta \quad (9)$$

여기서,  $x$ 는 흡착된 오염원의 양,  $m_{ad}$ 는 흡착제(토양)의 양,  $X$ 는 고체상의 중량비(mass ratio of the solid phase)로서 흡착제 양에 대한 흡착된 오염원의 중량을 의미한다.  $c_e$ 는 용액의 평형농도이며,  $k, \eta$ 은 경험상수로 Batch Test를 수행하여 Table 3과 같은 결과를 얻었다.

1차원 흐름에서는 흐름방향(종방향)의 이송확산계수만을 고려하게 되는데, 이때 이송확산계수는 식 (3)과 같이 분산항과 분자 확산항으로 설명할 수 있다. 분자 확산항은 확산되는 오염원의 종류에 의하여 결정되며, 분산지수는 흐름이 있는 다공성매질의 물리적 특성에 의하여 결정된다. 분산지수가 크다면 같은 유속으로 이송하더라도 오염원의 혼합도가 더 크다는 것을 의미한다. 분산지수를 구하기 위하여 다음 식 (10)과 같은 초기 및 경계조건을 가지는 해석해를 이용하는데, 이를

Table 3. Soil Properties for SUS and KUS

Properties			SUS	KUS
Saturated Hydraulic Conductivity ( $K_s$ , cm/hr)			60.0	8.0
Residual Water Content ( $\theta_r$ )			0.05	0.04
Saturated Water Content ( $\theta_s$ )			0.3788	0.4549
Parameters for van-Genutchen eq.	Drying Condition	a	0.237	0.037
		n	3.726	1.615
	Wetting Condition	a	0.062	0.041
		n	2.649	2.312
Adsorption Parameters		k	0.000026	0.002399
		$\eta$	1.43	0.96
Dispersivity(cm)			3.8314	6.1287

위해 두 가지 토양에 대한 농도변화곡선 (breakthrough curve)을 측정하였다. 해석해를 적용하여 동수역학적 이송확산계수를 추정할 경우 일반적으로 (11)과 같은 식을 사용한다(Bedient 등, 1994). 본 연구에서는 식 (11)을 이용하여 농도변화곡선에 대한 이송확산계수를 추정하였으며, 이 자료를 이용하여 계산한 분산지수는 Table 3과 같다. 여기서  $c$ 는 오염원의 농도,  $c_0$ 는 초기오염원의 농도,  $D_L$ 는 흐름 방향 이송확산계수,  $L$ 은 실험시료의 길이,  $\bar{v}$ 는 평균유속,  $t_a$ 는 오염원의 도달시간이다.

$$\begin{aligned} c(z, 0) &= 0 & z &\geq 0 \\ c(0, t) &= c_0 & t &\geq 0 \\ c(\infty, t) &= 0 & t &= 0 \end{aligned} \quad (10)$$

$$\frac{c}{c_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{L - \bar{v} t_a}{2\sqrt{D_L t_a}}\right) \quad (11)$$

비포화 흐름 및 오염원 이송확산을 측정하기 위하여 사용한 실험장치는 크게 시료용기 및 오염원 공급장치와 토양내 함수량과 오염원의 농도를 측정하는 장치로 나누어 볼 수 있다. 시료용기는 Fig. 1과 같이 TDR 탐침을 설치할 수 있도록 횡방향 세 개의 구멍을 세로 방향 50 mm 간격으로 설치한 내경이 250 mm, 길이가 600 mm인 투명한 아크릴기둥이다. 시료용기의 상단에는 토양시료에 공급되는 오염원을 균등하게 배분해 주기 위하여 다공성판과 가는 철망을 설치하였고, 시료용기의 하단에는 토양을 지지해 주며 유출수를 배수

시키는 다공성판과 가는 철망을 설치하였으며, 바닥에는 유출수를 배출시키는 배수구를 설치하였다. 오염원의 공급은 미세튜빙펌프를 이용하였는데, 이 장치는 회전수를 조절하여 원하는 유량을 공급하는 장치이다. 본 연구에서는 함수량과 오염원의 농도를 동시에 측정하기 위하여 TDR을 수평으로 토양시료에 설치하였다. 실험장치를 설치한 개략도는 Fig. 2와 같다.

Photo 1은 시료용기에 TDR 탐침이 설치된 장면인데 세 개의 횡방향 구멍으로 TDR 탐침을 설치하도록

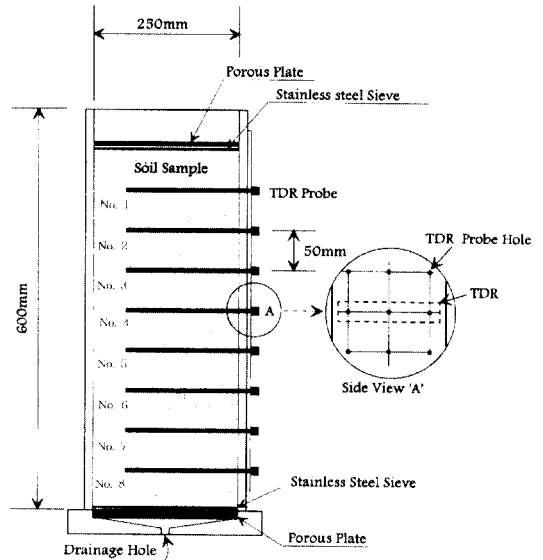


Fig. 1. Soil Column

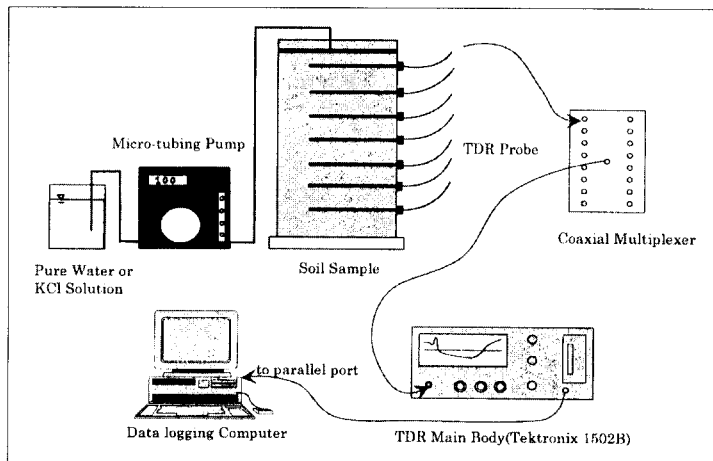


Fig. 2. Schematic of the Soil Column Experiment Apparatus

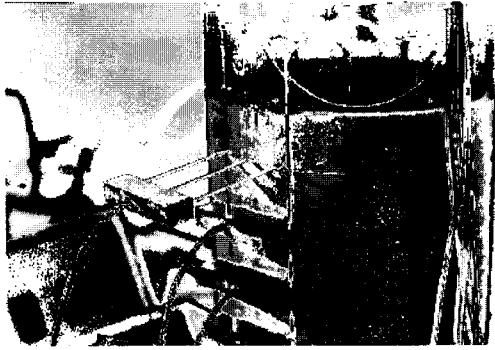


Photo 1. Soil Column Equipped by TDR

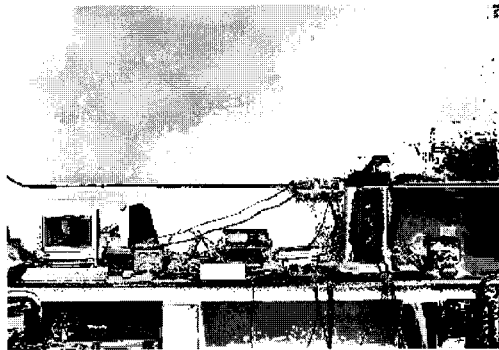


Photo 2. Soil Column Experiment Apparatus which Includes Soil Column, Tubing Pump, and TDR

제작하였다. Photo 2는 비포화 흐름 및 오염원 이송 확산을 측정하는 장면으로 왼쪽으로부터 자료수집을 위한 컴퓨터, TDR 본체, 다중연결장치, 시료용기 및 오염원공급을 위한 미세투빙펌프가 설치되어져 있다. Photo 2에서와 같이 미세투빙펌프를 통하여 흐름물이 토양시료에 공급되며, 시간과 공간에 따른 함수량의 변화와 오염원농도의 변화를 TDR을 통하여 측정하는데,

이때 각 탐침의 측정순서는 시료용기의 왼쪽에 있는 다중연결장치(multiplexer)에 의하여 조정되어진다. 탐침으로부터 반향되는 전자기파는 TDR 본체에 의하여 디지털 신호로 분석되며 이 자료는 병렬선을 따라 컴퓨터에 저장된다.

본 연구에서 수행한 실험은 Table 4에서 보는 바와 같이 비포화 정상흐름시료에 오염원을 투여한 SUSB1 경우와 비포화 천이흐름에 오염원을 투여한 SUSC1, SUSC2, KUSC1, KUSC2 등 5가지 경우로 구성된다. SUSB1 경우는 본 연구에서 사용한 TDR을 이용한 오염원 농도 측정법의 정확도를 확인하기 위하여 함수량이 일정한 상태에 도달한 비포화 정상흐름시료에 오염원을 투여하여 오염원이 이송, 확산되도록 하였다. SUSC1, SUSC2, KUSC1, KUSC2 등 4가지 경우는 비포화 천이흐름에서 오염원 이송확산에 관한 실험으로 시간과 공간에 따른 함수량과 오염원의 농도 변화를 관측하기 위하여 자연 건조시킨 토양으로 토양기동시료를 성형하고 여기에 오염원을 함유한 일정한 유입유량을 공급하여 주었다. 건조한 토양에 오염원이 유입될 경우 천이상태로 흐르는 토양내 함수량을 매개로 하여 오염원이 이송된다. SUSB1의 경우에는 우선 건조한 토양에 공급유량을 2.324 cm/hr로 하여 직접 공급하여 정상상태의 비포화 시료를 형성한 후, 농도 KCl 60 meq/L 수용액을 공급하였다. SUSC1의 경우에는 농도는 KCl 30 meq/L 수용액을 건조한 토양에 공급유량을 2.324 cm/hr로 하여 직접 공급하였고, SUSC2의 경우에는 농도는 KCl 60 meq/L 수용액을 건조한 토양에 공급유량을 2.324 cm/hr로 하여 직접 공급하였다. KUSC1의 경우에는 농도는 KCl 30 meq/L 수용액을 건조한 토양에 공급유량을 0.415 cm/hr로 하여 직접 공급하였고, KUSC2의 경우에는 농도는 KCl 60 meq/L 수용액을 건조한 토양에 공급유량을 0.415 cm/hr로 하여 직접 공급하였다.

Table 4. Experiment Case

Experiment Case	Initial Water Content	Initial Concentration (meq/L)	Concentration of Influent (meq/L)	Influent Flux (cm/hr/cm <sup>2</sup> )	Remark
SUSB1	0.22	0	60	2.324	Steady Flow
SUSC1	0.05	0	30	2.324	Transient Flow
SUSC2	0.05	0	60	2.324	Transient Flow
KUSC1	0.04	0	30	0.415	Transient Flow
KUSC1	0.04	0	60	0.415	Transient Flow

## 5. 실험결과 및 수치해와의 비교

### 5.1 실험결과분석

본 연구에서는 건조한 토양시료에 Table 4와 같은 조건의 유입유량을 가하는 1차원 실내실험을 수행하였다. 오염원 농도를 측정하기 위하여 본 연구에서 제안한 TDR을 이용한 측정법을 사용하였으며, 비포화 토양에서 시간과 공간에 대한 오염원의 이송특성을 측정할 수 있었다.

TDR을 이용한 오염원 농도 측정법의 정확도를 확인하기 위하여 먼저 SUSB1 경우에 관한 실험을 수행하였는데, 함수량을 0.22로 유지하였을 경우, 유입된 오염원 총량 ( $M_{in}$ )에 대한 측정된 오염원 총량 ( $M_{ob}$ )의 비( $M_{ob}/M_{in}$ )는 0.88-0.93이었으며, 오염원의 천이구간이 전진할수록 측정오차율이 줄어들었다.

SUSC1과 SUSC2의 경우 시간에 따른 습윤전선의 전진을 관찰할 수 있었는데, 함수량과 오염원 농도자료를 검토한 결과, 120분 후에는 습윤전선이 마지막 관측점을 지났고, 180분 후에는 시료전체에 걸쳐 거의 정상상태의 비포화 흐름이 유지되었다. 습윤전선이 전진함에 따라 습윤전선 부근에서 급격한 함수량의 변화가 발생하였지만, 함수량은 매우 안정적으로 측정되었다. 유입된 물의 총량 ( $Q_{in}$ )에 대한 측정된 함수량 ( $Q_{ob}$ )의 비( $Q_{ob}/Q_{in}$ )는 0.93-0.98로 습윤전선이 전진해 갈수록 오차율이 줄어들었다. 오염원의 농도도 대체로 안정적으로 측정되었지만, 함수량이 작은 영역에서는 정확도가 상대적으로 떨어지는 것으로 관측되었다. Fig. 3, Fig. 4는 SUSC1, SUSC2 경우에 대한 결과 중 TDR 2번, 4번 탐침에서 측정된 함수량과 오염원의 농도이다.

KUSC1과 KUSC2의 경우 SUS의 경우와 마찬가지로 시간에 따른 습윤전선의 전진을 관찰할 수 있었는데, SUS시료에 비하여 투수계수가 작은 KUS시료의 습윤전선은 매우 천천히 이동하였으며, 6시간 후에도 습윤전선이 3번 탐침에 머물러 있었다. Fig. 5, Fig. 6은 KUSC1, KUSC2 결과 중 TDR 1번, 2번 탐침에서 측정된 함수량과 오염원의 농도인데, 함수량은 매우 안정적으로 측정되었으나, 오염원 농도는 함수량에 따라 다른 측정오차율을 보였다. 측정자료에 의하면 습윤전선 부근의 함수량이 0.15보다 큰 영역에서는 유입농도 ( $c_{in}$ )에 대한 측정농도 ( $c_{ob}$ )의 측정오차

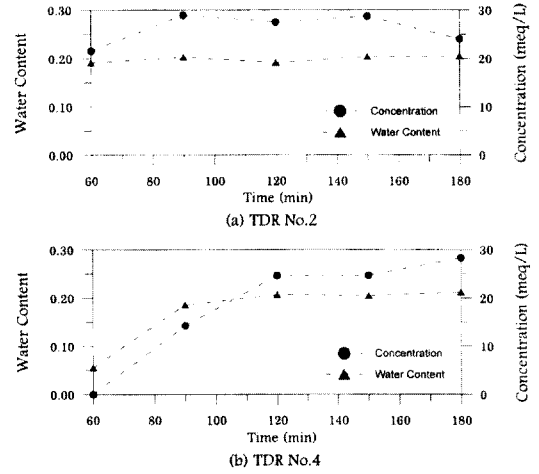


Fig. 3. Water Content and Concentration with Time Observed at (a) TDR No.2, (b) TDR No.4 : Case for SUSC1

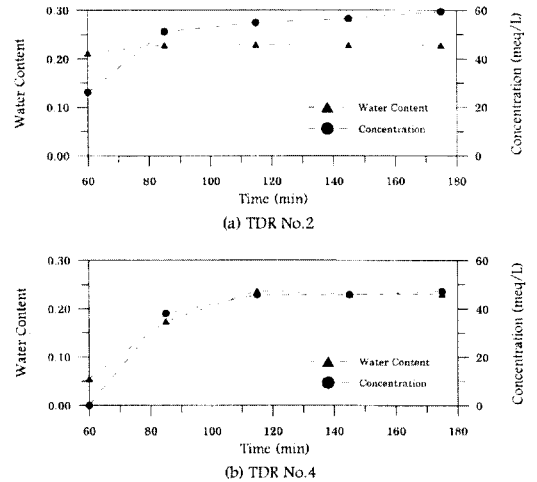


Fig. 4. Water Content and Concentration with Time Observed at (a) TDR No.2, (b) TDR No.4 : Case for SUSC2

( $(c_{in} - c_{ob})/c_{in} \times 100$ )가 약 5-10%로 안정적으로 농도를 측정한다고 판단되어진다. 하지만, 함수량이 0.15보다 작은 값을 가질 경우 상대적으로 큰 농도 측정값을 보여주었다. 함수량이 작은 경우 농도의 측정이 안정적이 않은 이유로는 TDR의 전기전도도 측정 특성에서 찾을 수 있다. 함수량이 작은 경우 토양입자를 덮고 있는 수막의 연결이 완전치 않으며, 이 경우

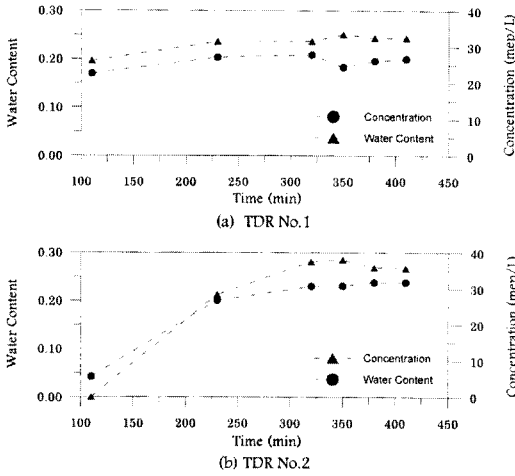


Fig. 5. Water Content and Concentration with Time Observed at (a) TDR No.1, (b) TDR No.2 : Case for KUSC1

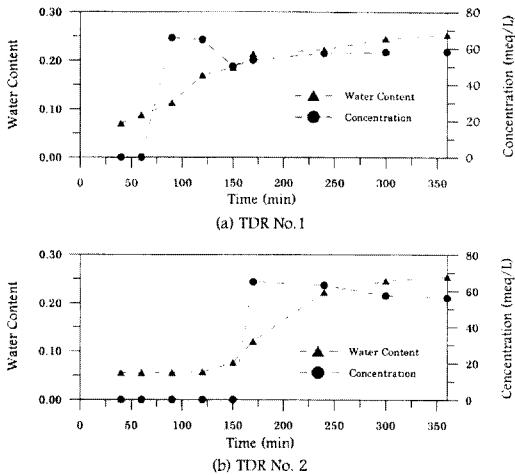


Fig. 6. Water Content and Concentration with Time Observed at (a) TDR No.1, (b) TDR No.2 : Case for KUSC2

TDR을 통하여 측정되는 전기전도도가 토양내 있는 오염원의 양을 정확히 반영해 주지 못한다. 또한, 함수량이 작으면 토양수 농도에 의한 전기전도도가 상대적으로 작아지는 반면 비선형성이 강한 토양의 고체상이나 부동수 영역에 의한 전기전도도가 상대적으로 증가하는 결과가 되기 때문에 측정되는 전기전도도가 오염원의 농도를 정확하게 반영하기가 어려워진다. KUS경우에 비하여 SUS경우에서 오염원의 농도가 안정적으

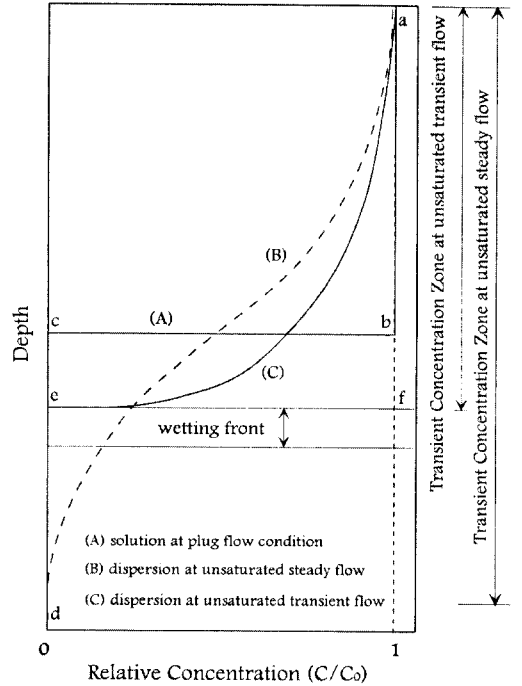


Fig. 7. Illustration for Solute Dispersion at the Wetting Front

로 측정된 것은 SUS토양특성상 습윤전선의 이동이 빠르게 일어나기 때문에 함수량 0.15이하인 영역에 습윤전선이 채류하는 시간이 짧아 함수량 0.15 이상을 빨리 유지하기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 8, 9와 같이 토양기둥내 함수량은 중형분포를 보이며 전진함을 알 수 있었고, 함수량을 매개로 하여 이송되는 오염원 또한 계단형의 농도분포를 보이는 것이 아니라 함수량의 분포와 비슷한 중형의 분포를 보이면서 전진하는 특징을 보였다. 즉, 초기 계단형 농도분포가 시간이 지남에 따라 습윤전선 후방으로 확산되어 농도의 천이구간을 가지는 것으로 관측되었다. 물론 함수량이 작은 영역에서의 오염원 농도의 측정이 안정적이지 않은 관계로 농도 천이구간을 실험자료를 통하여 규정하기는 매우 어렵지만, 함수량이 0.15를 넘기는 영역에서는 매우 안정적인 농도자료를 얻을 수 있기 때문에 이들 자료를 이용하여 개략적인 농도의 천이구간을 추정할 수 있었다. SUS의 경우 천이구간은 90분 후 약 12cm 정도였으며, KUS의 경우 6시간 후 약 10cm 정도였다. 이 결과들을 이용하여 천이흐름에서 농도의 천이구간에 대한 개념을 Fig. 7에 나타내었



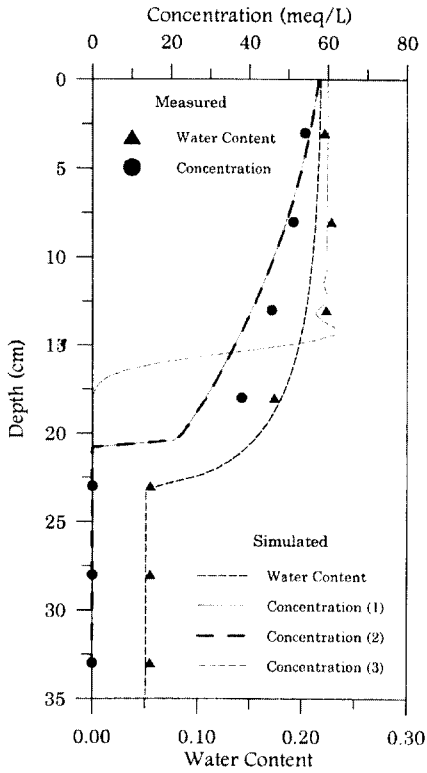


Fig. 8. Comparison between Measured and simulated Data after 85min :  
Case for SUSC2 Concentration  
(1) with Dispersion and Adsorption  
(2) with Dispersion without Adsorption  
(3) without Dispersion and Adsorption

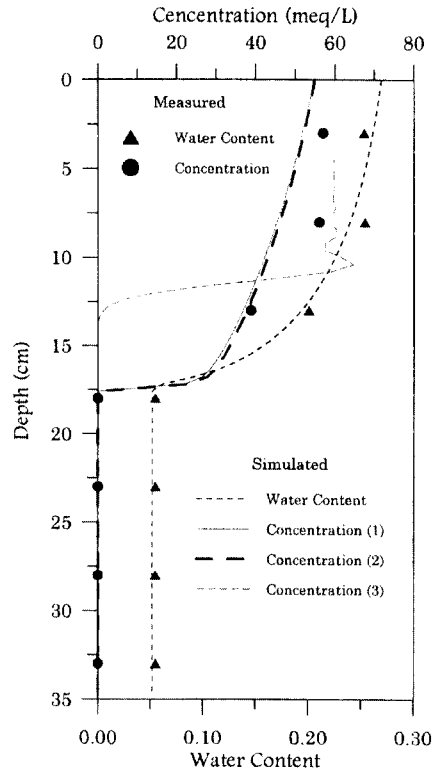


Fig. 9. Comparison between Measured and simulated Data after 360min :  
Case for KUSC2 Concentration  
(1) with Dispersion and Adsorption  
(2) with Dispersion without Adsorption  
(3) without Dispersion and Adsorption

다. 여기서 (A : a b c d)는 계단형 즉 분산확산을 고려하지 않았을 경우의 농도분포이며, (B : a d)는 정상상태의 흐름에 오염원이 유입될 경우 분산되는 형태를 보여주는 농도분포이다. (C : a e d)는 천이상태의 흐름에서 오염원이 유입될 경우 분산되는 형태를 보여주는 농도분포이다. Fig. 7에 의하면 오염원의 분산현상이 비포화 정상흐름과 비포화 천이흐름에서 다르게 나타남을 알 수 있다. 비포화 정상흐름시 농도분포는 계단형 농도의 중심점을 중심으로 하여 대칭형으로 분산되어지며 비포화 천이흐름시 농도분포는 흡윤전선 후방에 중형의 농도분포를 보인다. 이러한 결과는 건조한 토양 내로 유입되는 천이흐름의 흡윤전선 전방이 건조하기 때문인데 흡윤전선 전방에는 농도가 확산되기 위한 매개체가 없어 흡윤전선 전방으로 분산되어

야할 농도가 흡윤전선 후방에 누적되기 때문인 것으로 판단된다.

## 5.2 수치해와 비교

본 연구에서는 비포화 천이흐름과 오염원 이송확산에 대한 실험결과와 Kool과 van Genuchten(1992)에 의해 개발된 HYDRUS를 이용한 수치결과를 비교하였다. 본 연구에서 사용한 HYDRUS는 유한요소법을 이용한 수치모형으로 (Galerkin 방법을 이용하였으며, 보간함수로는 선형함수를 이용하였다. 수치모형을 개발할 경우 검증용 위하여 사용할 실험자료가 부족하기 때문에 적절한 한계조건을 가진 해석해를 이용하여 개발된 수치모형을 검증하고지는 있으나, 해석해가 가지는 적용의 한계로 인하여 다양한 경우에 대한 수치해의

적용성에는 항상 문제를 안고 있는 것이 현실이다. 본 연구에서 사용한 HYDRUS는 음해법을 이용하여 이송확산방정식을 해석하는데, 이 경우 일반적으로 수치확산이 발생하기 때문에 HYDRUS에서는 수치확산을 억제하기 위하여 확산계수에 보정계수를 적용하였다. 이러한 수치해를 실제영역에 적용하는데 있어 확산계수의 선택은 수치결과에 많은 영향을 주게 되는데, 실험자료와 비교함으로써 비포화정상흐름에서 오염원 이송확산에 대한 수치해의 적용시 확산지수, 흡탈착계수 등의 영향을 평가하고자 한다. HYDRUS 수행시 시간 간격은 초기 시간간격, 최대, 최소 시간간격 등을 입력자료로 사용함이다. 초기 시간간격을 이용하여 iteration을 하면서 최대, 최소 시간간격 내에서 iteration 횟수를 최소로 하는 각 step별 최적 시간간격을 찾아서 계산을 하게된다. 본 연구에서 사용한 초기 시간간격은 0.001 sec를 이용하였으며, 깊이 방향에 대한 mesh 간격은 1cm로 하였다.

습윤전선의 진진 및 함수량의 변화를 분석하기 위하여 수치해를 적용한 결과 실험결과와 그 경향이 거의 일치하고 있었다. SUS 경우에 대한 수치해의 결과, 시간이 지남에 따라 상부경계 표면으로부터 함수량이 정상상태로 유지되었으며, 약 2시간 후에는 습윤전선이 마지막 측정점 통과하였다. KUS 경우도 SUS의 결과와 마찬가지로 시간이 지남에 따라 습윤전선의 진진이 확연하게 나타나고 있었다. Table 4에서 제시한 유량을 공급하였을 때 정상상태의 함수량은 SUS의 경우 0.22였으며, KUS의 경우 0.26이었다. 즉, 위에서 제시된 함수량에 대한 토양의 비포화 투수계수는 그때 공급된 유량이 된다.

천이 오염원이송확산을 모의함에 있어 흡탈착의 영향을 분석하기 위하여 이송확산과 흡탈착을 모두 고려한 경우, 이송확산만 고려한 경우, 이송확산과 흡탈착을 고려하지 않은 경우 등 세 경우에 관한 수치해석을 수행하였고, 이들 결과와 실험결과를 비교하였다.

Fig. 8은 SUS2의 경우로 건조한 시료에 농도 60 meq/L의 오염원을 투여한 85분 후의 결과인데 측정된 함수량과 수치해를 통하여 모의된 함수량의 이송경향이 거의 일치하고 있다. 농도비교를 위하여 위에서 설명한 세 가지 경우의 수치모의 결과와 실험자료를 동시에 나타내었다. 수치해를 수행한 세 가지 경우의 결과를 비교하면 이송확산과 흡탈착을 고려하지 않은 경우에는 농도 천이구간에서 수치진동과 수치확산을 보였으며, 이송확산과 흡탈착을 모두 고려한 경우와 이

송확산만 고려한 경우의 결과는 거의 차이를 보이지 않았다. 이송확산과 흡탈착을 모두 고려한 경우의 수치결과와 실험결과를 비교하면 수치결과가 실험결과에 비하여 더 많이 확산되어 있음을 알 수 있다. 비포화 천이흐름에서 오염원 이송확산시 실험결과와 수치결과 모두 계단형 농도분포가 아니라 농도의 천이구간을 가지는 경향을 보여주고 있다. 함수량이 작은 습윤전선에서는 오염원 이송확산의 매체인 수막(water film)의 연결이 원활하지 못하여 이송확산이 발생하지 못하기 때문에 습윤전선 후방에 농도가 정체되는 형상을 보여 주고 있다.

Fig. 9는 KUS2의 경우로 건조한 시료에 농도 60 meq/L의 오염원을 투여한 360분 후의 결과인데, 측정된 함수량과 수치해를 통하여 모의된 함수량의 이송경향이 거의 일치하고 있다. 수치해를 수행한 세 가지 경우의 결과를 비교하면 이송확산과 흡탈착을 고려하지 않은 경우에는 SUS의 결과와 같이 농도천이구간에서 수치진동과 수치확산을 보였으며, 이송확산과 흡탈착을 모두 고려한 경우와 이송확산만 고려한 경우의 결과는 약간의 차이를 보였는데, 이는 SUS 토양에 비하여 KUS 토양이 더 큰 흡착도를 가지고 있음을 의미한다. 이송확산과 흡탈착을 모두 고려한 경우의 수치결과와 실험결과를 비교하면 KUS 토양에서도 SUS 토양의 결과와 같이 수치결과가 실험결과에 비하여 더 많은 확산특성을 보이고 있음을 알 수 있다. 이러한 현상은 수치모형을 적용할 경우 수치해가 가지고 있는 수치확산이나 토양이 가지는 특유한 성격(토성, 확산지수, 흡탈착계수 등), 그리고 실험자료의 크기효과 등에 의하여 영향을 받는 것으로 판단되며, HYDRUS를 직접 현장에 적용할 경우 이러한 영향을 고려하여 적절히 조정된 확산지수를 사용하여야만 정확한 결과를 기대할 수 있을 것이다. 특히, 이송확산계수를 적용함에 있어 수치해가 가지는 고유의 수치확산 및 수치진동에 대하여 고려하여야 할 것으로 판단된다.

## 6. 결론

본 연구에서 천이상태의 비포화 오염원 이송확산 특성을 분석하기 위하여 토양의 물리, 화학적 특성을 알고 있는 두 종류의 현장토양(SUS, KUS)과 TDR을 이용한 1차원 실내실험을 수행하였고, 실험결과와 수치해를 비교하여 천이상태의 비포화 오염원 이송확산 특성을 분석하였다.

천이상태의 비포화 오염원의 농도 변화를 관측하기

위하여 본 연구에서 개발한 TDR을 이용한 오염원 농도 측정법을 이용하였는데, 함수량이 변하는 비포화 전이흐름하의 오염원농도를 측정할 수 있었다. TDR을 이용한 오염원 농도 측정법의 정확도를 확인하기 위하여 먼저 SUSBI 경우에 관한 실험을 수행하였는데, 함수량을 0.22로 유지하였을 경우, 유입된 오염원 총량에 대한 측정된 오염원 총량의 비는 0.88-0.93이었으며, 오염원의 천이구간이 전진할수록 측정오차율이 줄어들었다.

본 연구에서 제안한 측정법을 천이상태의 비포화 적용한 결과 함수량이 0.15이하에서는 측정오차가 크지만 함수량이 0.15이상일 경우 약 5-10%의 오차율을 보였다. 그리고 공급되는 오염원의 농도가 클 경우 농도가 작은 경우에 비하여 측정된 농도의 상대오차가 작은 것으로 관측되었다. 이러한 결과는 TDR의 전기전도도 측정 특성에서 찾을 수 있었다. 즉, 함수량이 작은 경우 토양입자를 둘러싸고 있는 수막의 연결이 불완전한 뿐 아니라 토양수 농도에 의한 전기전도도의 절대크기가 작아지게 되는데, 이때 비선형 특성이 강한 토양의 고체상 또는 부동산영역에 의한 전기전도도의 영향이 상대적으로 증가하게 되어 총전기전도도중 토양수 농도에 의한 전기전도도 부분을 구분해 내는 것이 어렵기 때문인 것으로 판단된다. 하지만 본 논문에서 개발된 천이상태의 오염원 농도 측정법은 0.15이상의 함수량에서 매우 좋은 측정결과를 보여 주고 있어 기존의 방법에 비하여 정확하고 적용이 용이한 측정방법으로 판단된다.

비포화 천이흐름하의 오염원 이송확산 실험에서는 급격한 습윤전선의 전진에 따른 鐘形의 함수량 변화를 관측할 수 있었고, 이때 오염원의 농도는 함수량의 분포와 유사한 농도분포 특성을 보였다. 또한 예비실험에서 측정된 매개변수를 입력자료로 하여 수행한 수치결과와 실험결과를 비교하였는데 비포화 흐름특성은 실험결과와 수치결과가 정량적으로 일치하는 경향을 보였으나, 오염원 이송확산 특성은 정량적으로 수치결과가 실험결과보다 더 많이 확산되는 경향을 보였다. 따라서 수치모형을 현장에 적용할 경우 확산지수 결정에 주의하여야 할 것으로 판단된다. 즉, 수치모형에 적용할 확산지수는 BTC 실험을 통하여 측정된 확산지수, 수치확산, 흡착계수, 적용영역의 크기 등을 고려하여 결정하여야 할 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

- 박재현, 서인원, 선우중호 (1999). "TDR(Time Domain Reflectometry)를 이용한 비포화 토양에서 천이상태의 오염원 이송확산 특성에 관한 연구 : (1) 함수량과 상대전기전도도의 관계". 한국수자원학회지, 한국수자원학회, (심사중)
- Bedient, P.B., Rifai, H.S., and Newell, C.J. (1994). *Ground Water Contamination*, Prentice Hall, N. J.
- Elick, D.E., Kachanoski, R.G., Pringle, E.A., and Ward, A.L. (1992). "Parameter estimates of field solute transport models based on TDR measurements" *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Soil Sci. Soc. Am., Vol. 56, pp. 1663-1666.
- Kachanoski, R.G., Pringle, E., and Ward, A. (1992). "Field measurement of solute travel times using Time Domain Reflectometry." *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Soil Sci. Soc. Am., Vol. 56, pp. 47-52.
- Kim, D.J. (1996a). "Application of an automated Time Domain Reflectometry to solute transport study at field scale : Experimental methodology and calibration of TDR." *J. of Econ. Environ. Geol.*, Econ. Environ. Geol., Vol. 29, No. 6, pp. 699-712.
- Kim, D.J. (1996b). "Application of an automated Time Domain Reflectometry to solute transport study at field scale : Transport concept." *J. of Econ. Environ. Geol.*, Econ. Environ. Geol., Vol. 29, No. 6, pp. 713-724.
- Kool, J.B., and van Genuchten, M.T. (1992). *One dimensional variably saturated flow and transport model*, IGWMC, Colorado School of Mines.
- Topp, G.C., Yanuka, M., Zebchuk, W.D. and Zegelin, S. (1988). "Determination of electrical conductivity using Time Domain Reflectometry: Soil and water experiments in coaxial lines." *Water Resour. Res.*, AGU, Vol. 24, pp. 945-952.
- van Genuchten, M.T. (1980). "A closed form equation for predicting the hydraulic

- conductivity of unsaturated soils." *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Soil Sci. Soc. Am. 44, 892-898.
- Ward, A.L., Kachanoski, R.G., and Elrick, D.E. (1994). "Laboratory measurements of solute transport using Time Domain Reflectometry." *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Soil Sci. Soc. Am., Vol. 58, pp. 1031-1039.
- Wraith, J.M., Comfort, S.D., Woodbury, B.L., and Inskip, W.P. (1993). "A simplified waveform analysis approach for monitoring solute transport using Time Domain Reflectometry." *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Soil Sci. Soc. Am., Vol. 57, pp. 637-642.

(논문번호:99-042/접수:1999.05.20/심사완료:1999.11.29)