

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

(1) 함수량과 상대전기전도도의 관계

Study on Characteristics of Transient Solute Transport in the Vadose Zone by Using TDR: (1) Relationship between Water Content and Relative Electrical Conductivity

박재현* / 서일원** / 선우중호***

Park, Jae Hyeon / Seo, Il Won / Sonu, Jung Ho

Abstract

This study is to develop a method of measuring the soil water concentration by using TDR, which is based on the relationships between the bulk soil electrical conductivity of soil and the reflected wave of TDR. The proposed monitoring method is combined with two important relationships. One is that between the bulk soil electrical conductivity and the solute concentration, which is known to be linear at a constant volumetric soil water content and the other is that between the relative bulk soil electrical conductivity and the water content at a constant concentration. Some formulas have been proposed to solve the second relationship, but a new formula and the critical water content are proposed to improve the accuracy of measurement. This proposed formula estimates the relative bulk soil electrical conductivity for water contents which is divided to two regions, linear and nonlinear, by the critical water content. As the result of the comparison with other formulas, the proposed formula is proved to be superior to other formulas and to be an available method to apply to the unsaturated transient solute transport.

Keywords: solute transport, TDR, soil electrical conductivity, critical water content

요 지

본 연구에서는 TDR의 반향파의 특성과 총토양전기전도도의 관계를 이용한 비포화 토양에서의 용존오염원 농도를 측정하는 방법을 개발하였다. 본 연구에서 제안한 방법은 두 가지 중요한 관계를 결합한 것으로 첫 번째는 함수량이 일정한 경우 전기전도도와 토양수 농도는 선형관계를 유지한다는 것이며, 두 번째는 천이상태의 용존오염원의 농도를 측정할 수 있게 하기 위해 함수량과 전기전도도의 관계를 설정하는 것이다. 함수량과 전기전도도의 관계를 추정하는 식들이 여러 연구자들에 의하여 제안되었으나, 본 연구에서는 측정의 정확도를 높이기 위하여 한계함수량의 개념을 도입한 새로운 추정식을 제안하였다. 한계함수량 개념을 이용하여 실험자료를 선형, 비선형 구간으로 나누어 분석하였는데, 실험자료의 반영정도를 증가시킬 수 있어 본 연구에서 제안된 식을 이용하여 추정된 전기전도도와 함수량관계는 다른 제안식에 비하여 개선된 결과를 보여 주었다. 본 연구에서 제안된 전기전도도와 함수량관계 추정식을 이용한 천이상태의 오염원 농도 측정법은 함수량이 급하게 변하는 토양에도 적용할 수 있는 매우 유용한 방법으로 판단된다.

핵심용어 : 오염원 이송확산, TDR, 토양전기전도도, 한계함수량

* 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

지표에서 유출된 오염원은 비포화 영역을 통과하여 포화 영역에까지 이르러진다. 이 때 비포화 토양에서의 이송확산특성은 오염원이 확산된 토양의 범위와 지하수대로 유입되는 오염원의 분포 및 거동 등을 예측하기 위해 필요한 매우 중요한 특성중 하나이다. 하지만, 토양내 용존 오염물은 토양의 고유특성 외에도 물(토양수)을 매개로 하여 이송 확산되기 때문에 그 매개가 되는 토양의 함수량 변화에 큰 영향을 받게되며, 따라서 시간에 따라 함수량 변화를 보이는 천이상태의 비포화 토양에서 이송 확산되는 오염원의 농도를 실시간으로 측정하는 것은 매우 어려운 것으로 알려지고 있다. 이러한 특성을 알아내기 위하여 많은 실험기구와 방법들이 제안되었는데(Klute, 1986), 이중 최근에 많은 주목을 받고있는 측정장치가 TDR이다. TDR을 이용하여 토양내 함수량을 측정하는 방법은 토양의 입피턴스와 함수량의 관계를 이용하는데, TDR을 이용하여 토양내 입피턴스 변화를 측정하기 위해 함수량 변화에 따라 변하는 전자기파의 반향속도를 측정한다(박재현 등, 1997). 반면 TDR을 이용하여 토양내 오염원의 농도를 측정하는 방법은 반향되는 전자기파의 크기(voltage)를 이용하게 된다(박재현 과 윤성용, 1998). 토양내에서 오염원의 농도가 변하면 토양의 저항, 입피턴스가 변하기 때문에 TDR의 탐침을 통하여 반향되는 전자기파의 크기는 토양내의 농도의 변화에 따라 반향정도를 달리하게 된다. 이때 반향되어 오는 전자기파의 크기 변화를 분석하여 토양내 입피턴스의 변화를 측정하고, 입피턴스의 변화로부터 총토양전기전도도(bulk soil electrical conductivity, σ_b)를 추정하게 된다(Topp 등, 1988; Nadler 등, 1991; Heimovaara 과 Bouten, 1992). 이 방법은 지하수에 용해되어 있는 이온의 전기전도도특성을 이용하는 방법이기 때문에 오염원의 농도가 너무커지게 되면 전기전도도가 너무 크게 되어 반향과의 감쇄정도를 이용한 농도추정이 어려워지는데, van Loon 등(1990)은 TDR을 이용한 농도추정의 한계를 CaCl_2 6g/L로 제시하였다. 이 특성을 오염원 농도추정에 쉽게 적용할 수 있게하는 중요한 가정은 '일정한 함수량에서 토양내 용액농도와 전기전도도는 선형적기동을 한다는 것이다(Kachanoski 등, 1992). 박재현 등(1998)은 오염원의 농도와 토양의 총전기전도도의 선형성에 관하여 연구하였는데, 여기서 Dalton 등(1984), Topp 등(1988), Yanuca 등

(1988), Zegrin 등(1989)이 제안한 식들을 비교한 결과 Dalton 등(1984), Topp 등(1988), Yanuca 등(1988)이 제안한 식은 토양의 총전기전도도를 추정하는데 좋은 선형성을 보여주고 있음을 밝혔다.

토양에 누출되는 화학물질의 농도변화를 측정하기 위하여 전기전도도와 토양수 농도의 관계나 함수량에 따른 전기전도도의 관계를 규명하려는 연구가 많은 연구사들에 의하여 수행되어 왔으나(Shamir 와 Harleman, 1967; Silliman와 Simpson, 1987; Gupta와 Hanks, 1972; Rhoades 등, 1976), 비포화 천이상태의 오염원 이송확산 현상은 시간에 따라 함수량이 계속 변하기 때문에 오염원의 농도를 측정하기 위하여 함수량과 토양의 전기전도도, 오염원농도와 전기전도도의 관계를 동시에 설명하여야만 하는 어려움이 있다. 본 연구에서는 TDR을 이용한 실험을 통하여 함수량과 토양의 전기전도도, 오염원농도와 전기전도도의 관계를 검토하고 이를 이용하여 비포화 토양내의 함수량과 오염원의 농도를 동시에 측정하는 방법을 제안하였다.

2. 전기전도도와 토양수 농도의 관계

토양이 일정한 함수량을 유지할 경우 Kachanoski 등(1992)은 비포화 토양의 총전기전도도와 토양수 농도가 선형관계를 유지한다고 제안하였는데, 박재현과 윤성용(1998)은 이 관계를 TDR 실험을 통하여 확인하였다. 이 관계는 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$C = A \sigma_a + B \quad (1)$$

여기서, C 는 토양수 농도(meq/L), σ_a 는 토양의 총전기전도도 (bulk soil electrical conductivity, S/m), A, B 는 경험상수이다. σ_a 는 고체상(solid phase of soil)과 액체상(liquid phase of soil, soil solution) 등 두 가지의 전도요소(conducting element)에 의하여 구성되어지는데, 그 관계는 다음 식 (2)와 같다(Rhoades, 1984; Rhoades 등, 1989).

$$\sigma_a = \sigma_s + T \theta \sigma_w \quad (2)$$

σ_s 는 토양의 고체상에 의한 전기전도도, σ_w 는 토양의 액체상(토양수, soil water)에 의한 전기전도도이다. T 는 토양용적 내의 입자와 입자 사이를 흐르는 토양수의 복잡한 기하학적 배열에 의하여 발생하는 입피턴스의 비틀림 정도(tortuosity)를 조정해주는 전송

계수(transmission coefficient, ≤ 1)이다. 여기서 σ_s 와 T 는 토양의 특성에 의하여 결정되어지는 인자인데, 특히 T 는 함수량에 의해 영향을 받는다. 일정한 함수량을 가진 경우 식 (2)는 식 (3)과 같이 비포화 토양의 충전기전도도와 토양수 농도의 선형관계로 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 토양의 충전기전도도를 추정하기 위하여 Topp 등(1988)이 제안한 식을 사용하였다.

$$\sigma_u = A' \sigma_w + B' \quad (3)$$

3. 함수량과 전기전도도의 관계

일정한 함수량을 갖는 비포화 토양의 충전기전도도와 토양수 농도의 선형관계를 이용하여 천이상태의 오염원 이동을 추정하려면, 함수량에 따른 충전기전도도와 토양수의 농도와의 관계를 규정하여야만 한다. 본 장에서는 주어졌 일정한 농도 하에서 함수량과 충전기전도도의 관계를 설명하고자 한다.

토양에서 측정되는 전기전도도는 토양 내에서의 염도(salinity)를 결정하는 중요한 인자로 특히 농업에서는 매우 중요한 특성으로 간주된다. 토양에 측정되는 화학물질의 농도변화를 추정하기 위하여 실시간으로 전기전도도를 측정하고 이를 이용하여 토양수 농도를 추정하는 연구들이 있어 왔으며(Shamir and Harleman, 1967; Silliman and Simpson, 1987), 현재까지도 이론적이고 기술적인 많은 연구들이 수행되고 있다. 특히 Gupta와 Hanks(1972)는 전기전도도 측정을 위한 4극 전기전도도기(4 electrode)를 이용하여 토양의 전기전도도를 측정하였고, Rhoades 등(1976)은 현장에 적용 가능한 4극 전기전도도 측정센

서를 개발하기도 하였다. 특히 이들은 4극 전기전도도 측정법을 통하여 함수량에 따른 전기전도도의 관계를 규명하려는 연구를 수행하였다. Keller와 Frischrecht(1966)는 포화상태에 대한 비포화상태의 충전기전도도 비인 상대전기전도도(relative electrical conductivity, $\sigma_{ra}(\theta) = \sigma_u(\theta) / \sigma_w(\theta_s)$)를 이용하여 포화도(S)와 상대전기전도도의 관계를 지수함수식으로 제안하였다. 여기서 주목할 점은 한계포화도(critical saturation, S_{cr})의 개념을 도입한 것이다. 여기서 한계포화도란 토양입자 표면을 덮고 있는 수막(water film)이 연속적으로 연결되는 한계지점의 포화도로 정의되는데, 이 연구에서는 Sandstone에 대한 한계포화도를 0.25로 보았다. 또한, Gupta와 Hanks(1972)는 함수량과 상대전기전도도의 관계를 실험을 통하여 규명하였는데, 상대전기전도도는 함수량에 대해 선형관계를 가지고 있음을 보였다. Rhoades 등(1989)은 토양수의 부동수영역(immobile region)과 동수영역(mobile region)을 분리하여 고체상 충전기전도도와 토양수 충전기전도도에 대한 토양의 충전기전도도의 관계를 Table 1과 같이 함수량의 함수로 표시하였다. Mualem과 Friedman(1991)은 비포화 투수계수 유도 원리를 이용하여 함수량에 대한 상대전기전도도를 추정하는 지수식을 제안하였다.

여기서, $\theta_w (= \theta_{ms} + \theta_{mv})$ 는 체적함수량, θ_{ms} 는 부동수영역의 체적함수량, θ_{mv} 는 동수영역의 체적함수량, 그리고 θ_{solid} 는 고체상의 부피로 함수량 산정과 같은 개념의 유추량이다. Rhoades 등(1989)은 토양의 충전기전도도를 고체상 충전기전도도와 토양수 충전기전도도에 대한 관계를 식으로 표현하였는데, 토양수의 영향을 부동수영역과 동수영역으로 분리하여 고려하였

Table 1. Proposed Formula for the Relationship between Water Content and Relative Electric Conductivity

Proposer	Proposed Formula
Keller & Frischrecht (1966)	$\sigma_{ra}(S) = S^n \quad S > S_{cr}, n \approx 2$ $\sigma_{ra}(S) = aS^n \quad S < S_{cr}, n \approx 4 \sim 5$
Gupta & Hanks(1972)	$\sigma_{ra}(\theta) = a\theta + b$
Rhoades et al. (1989)	$\sigma_u = \left[\frac{(\theta_{solid} + \theta_{ms})^2}{\theta_{solid}} \sigma_s \right] + (\theta_w - \theta_{ms}) \sigma_{mv}$
Mualem & Friedman (1991)	$\sigma_{ra}(\theta) = \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^{2.5}$

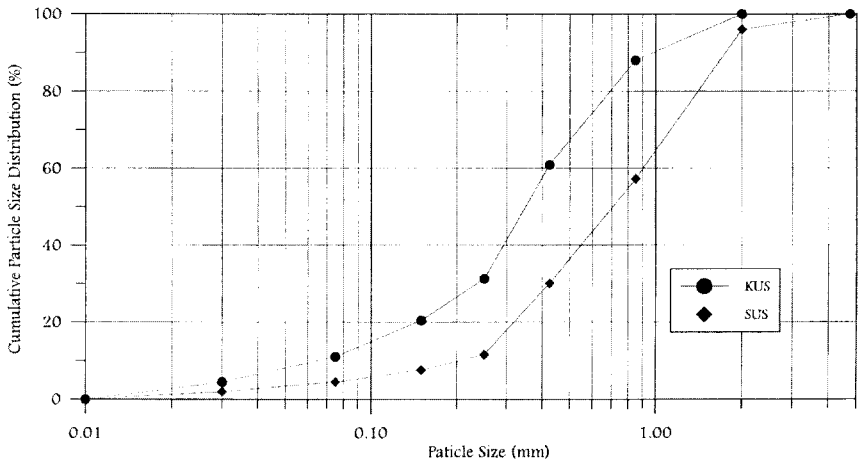


Fig. 1. Cumulative Particle Size Distribution for KUS and SUS

다. 이때 토양수의 충전기전도도가 지배적인 영역(함수량이 큰 구간)에서는 충전기전도도와 토양수 농도를 선형관계로 함수량이 작은 구간에서는 비선형 관계로 볼 수 있다. 이 식은 식을 구성하는 항들의 물리적 의미가 매우 뛰어나지만, 함수량을 부동수영역과 동수영역으로 분리할 뿐만 아니라 고체상 충전기전도도와 토양수 충전기전도도를 분리하여야 하므로, 실험을 통하여 변수들을 설정하기가 상당히 어려운 단점이 있다. 반면 Gupta와 Hanks(1972)는 함수량과 상대전기전도도의 관계를 선형식으로 가정하여 적용이 매우 용이한 장점을 지니고 있지만, 비선형기동을 하는 함수량이 작은 영역에서는 정확한 모의가 어려운 단점을 가지고 있다. Mualem과 Friedman(1991)은 지수식을 제안하였는데, 비포화 투수계수 유도원리를 이용하여 함수량에 대한 상대전기전도도를 추정하는 식으로 함수량과 전기전도도에 대한 물리적 의미를 가지며, 특히 포화상태의 상대전기전도도만 알고 있으면 비포화상태의 상대전기전도도를 추정할 수 있어 적용이 매우 용이한 장점이 있지만, 비포화영역을 단지 포화 충전기전도도와 함수량의 지수식으로만 추정하기 때문에 실측치와 큰 차이를 나타내는 단점이 있다.

Table 1에서 제안된 식들을 검토하기 위하여 본 연구에서는 TDR을 이용하여 2가지 토양(SUS, KUS)의 전기전도도를 측정하였다. 본 연구에서 사용된 SUS시료는 사토에 해당하며, KUS시료는 사토와 양질사토의 중간에 해당하는 토양인데, 각 시료의 입경분포는 Fig. 1과 같다. 토양수 농도는 KCl 0meq/L, 30meq/L, 60meq/L 등 3가지 경우를 사용하였으며,

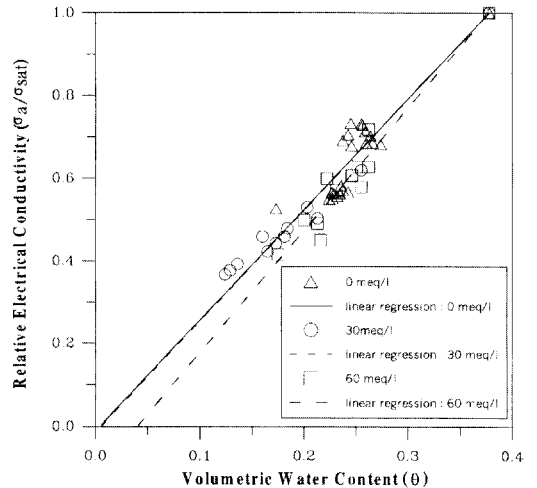
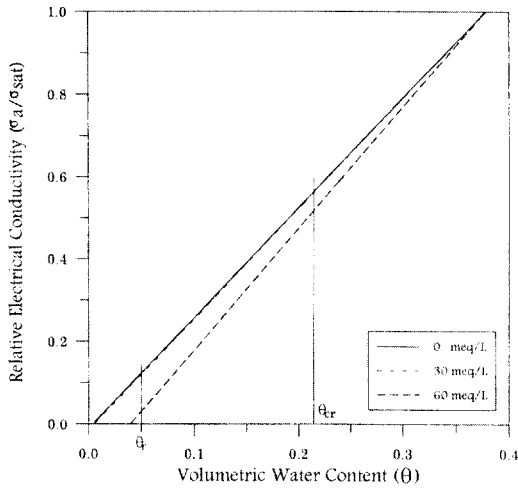
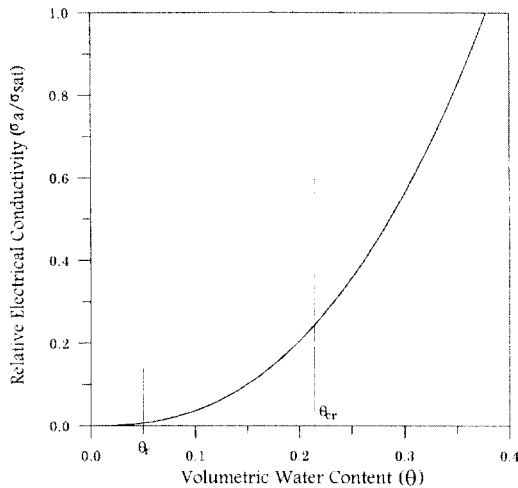


Fig. 2. Relationship between the Relative Bulk Soil Electrical Conductivity and the Volumetric Water Content (SUS Soil) by Using Linear Regression (Gupta & Hanks, 1972)

함수량을 변화시키며 토양의 충전기전도도를 Topp의 추정식을 이용하여 추정하였다. 이를 포화 충전기전도도에 대한 각 함수량별 상대전기전도도로 계산하였는데, 그 결과는 Fig. 2와 같다. 여기서 직선으로 표시된 것은 Gupta와 Hanks(1972)가 제안한 식을 이용한 회귀분석결과이다. 이 결과와 Table 1에 제안된 Gupta와 Hanks(1972)와 Mualem과 Friedman(1991)이 제안한 식을 이용하여 각 함수량에 대한 총



(a) By Using the Gupta & Hanks(1972)



(b) By Using Equation Proposed by Mualem(1991)

Fig. 3. Relationship between the Bulk Soil Electrical Conductivity and the Soil Water Concentration for Given Water Content(SUS Soil)

전기전도도와 토양수 농도의 관계를 구하였으며, 그 결과는 Fig. 3(a), (b)와 같다. 기존에 제안된 추정식들의 정확도를 검토하기 위하여 농도에 따른 총전기전도도의 개념적 제약조건을 다음 식 (4a), (4b)와 같이 설정하였다.

$$\sigma_a > \sigma_s \quad (4a)$$

Table 2. 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

$$\sigma_{a,60} > \sigma_{a,30} > \sigma_{a,0} \quad (4b)$$

여기서 $\sigma_{a,60}$, $\sigma_{a,30}$, $\sigma_{a,0}$ 는 토양수의 농도가 60 meq/L, 30 meq/L, 0 meq/L일 경우의 토양 총전기전도도를 의미한다. 본 연구에서 사용한 2가지 토양 SUS, KUS의 포화 토양 총전기전도도는 Table 2와 같다. 제약조건으로 제시된 식 (4a)와 같이 고체상의 전기전도도가 총전기전도도보다 항상 작아야 하며, 식 (4b)와 같이 같은 함수량일 경우 토양수의 농도가 함수율 총전기전도도를 커져야 한다.

Fig. 3(a)는 Gupta & Hanks(1972)의 추정식에 의한 결과인데 함수량이 큰 영역은 추정이 비교적 양호하지만, 함수량이 작은 영역에서는 식 (4a)와 (4b)의 제약조건 모두를 만족시키지 못한다. Fig. 3(b)는 Mualem 과 Friedman(1991)의 추정식에 의한 결과인데, 식 (4a)와 (4b)의 제약조건을 만족하나, 각 함수량별 추정 값들의 정확도가 떨어진다.

4. 함수량 변화에 따른 상대전기전도도 추정식 제안

본 연구에서는 일정한 농도 하에서 함수량과 상대 전기전도도의 관계를 추정하는 기존에 제안된 식의 한계를 극복하기 위하여 기존의 제안식을 보완하는 새로운 식을 제안하였다. 기존의 제안식들이 가지고 있는 한계는 식 (4)와 같은 제약조건과 함수량이 큰 영역에서 나타나는 함수량과 상대전기전도도의 선형기동특성, 그리고 함수량이 작은 영역에서 나타나는 비선형기동 특성 등을 동시에 만족시키지 못한다는 것이다. 이러한 한계를 만족하는 회귀식을 구하기 위하여 본 연구에서는 한계함수량(critical water content, θ_{cr})의 개념을 도입하였다. Keller와 Frischrecht(1966)가 제안한 한계포화도는 포화도와 전기전도도에 관한 물리적 특성을 부여하였지만, 실험을 통하여 측정하기가 매우 어렵다. 본 연구에서 제안한 한계함수량이란 상대전기전도도와 함수량이 선형관계를 유지하는 최저 한계함수

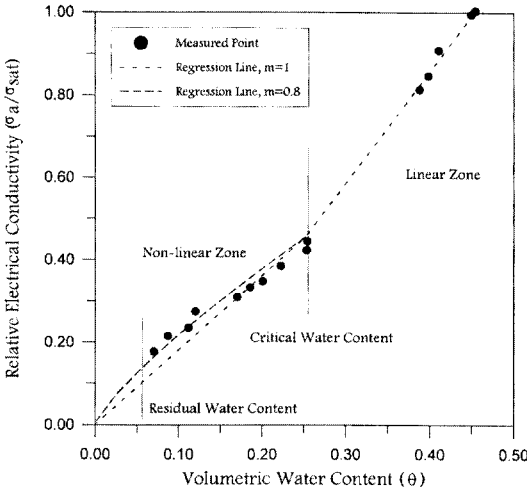


Fig. 4. Definition of Critical Volumetric Water Content

량으로 식 (5)와 같이 정의되며, 실험자료와 식 (6)의 상대오차를 최소화 하는 경험상수 n 을 결성함으로 한계함수량을 구할 수 있다.

$$\theta_{cr} = \theta_r + n(\theta_s - \theta_r), \quad 0 < n < 1 \quad (5)$$

여기서 θ_r 은 잔류함수량, θ_s 은 포화함수량, n 은 경험상수이다. 식 (5)와 같이 n 이 작을 수록 한계함수량이 작아지지만 잔류함수량보다는 큰 값을 나타낸다. Fig. 4는 함수량에 대한 상대전기전도도의 실험자료와 선형영역과 비선형영역을 분리하여 함수량과 상대전기전도도의 관계를 추정할 결과를 보여주고 있는데, 선형이 유지되는 영역 중 최저함수량이 본 논문에서 제안한 한계함수량이다. Fig. 4에서와 같이 상대전기전도도와 함수량의 관계는 한계함수량보다 함수량이 큰 영역에서는 선형성을 유지하였으나, 한계함수량보다 함수량이 작은 영역에서는 선형성을 유지하지 못한다. 본 연구에서는 식 (5)와 같이 정의된 한계함수량을 이용하여 함수량에 대한 상대 전기전도도의 관계를 다음 식 (6a), (6b)와 같이 제안하였다.

$$\sigma_a = \sigma_{sat} (a\theta + b) \quad \theta_{cr} \leq \theta \leq \theta_s \quad (6a)$$

$$\sigma_a = \sigma_{sat} \left(\frac{\theta}{\theta_{cr}} \right)^m (a\theta_{cr} + b) \quad 0 < \theta < \theta_{cr} \quad (6b)$$

여기서 m 은 경험상수이다. 본 논문에서 제안한 함수량과 상대전기전도도의 관계는 식 (6a)와 같이 선형식을 기본으로 한다. 즉, 함수량이 한계함수량보다 큰 구간은 선형으로 처리하는데 이 경우 선형 추정식은 $(\theta_s, \sigma_{ra, sat}(=1))$ 점을 항상 통과하기 때문에 식 $\sigma_{ra} = a(\theta - \theta_s) + 1$ 를 만족한다. 함수량이 한계함수량보다 작은 비선형구간에 대한 추정을 위하여 식 (6b)와 같이 보정계수(correction factor, θ/θ_{cr})를 도입하였다. 이때 비선형 추정식이 원점을 지나는 것으로 가정하였으며, 실험자료를 이용하여 경험상수 m 을 추정하게 된다.

5. 제안식의 적용

본 연구에서 제안한 식을 먼저 SUS토양에 적용하였는데, 그 결과는 Fig. 5와 6과 같다. 이 결과는 n 을 0.5로 하여 한계함수량을 구하였으며, m 을 1로 하여 함수량에 따른 상대전기전도도를 계산하였다. Fig. 5는 함수량에 따른 상대전기전도도의 결과를 나타낸 결과이며, 이 관계를 이용하여 각 함수량별 충전기전도도에 대한 토양수 농도의 관계를 구한 것이 Fig. 6인데, 여기서 각 함수량에 대한 충전기전도도와 토양수 농도의 관계는 매우 양호한 선형성을 보이고 있다. KUS토양에 적용한 결과는 Fig. 7(a)와 7(b)에 나타난 바와 같으며, Fig. 7(a)는 실험자료를 이용하여 선형구간에 대한 회귀분석을 한 결과이며, Fig. 7(b)는 제안식을 적용하여 함수량과 상대전기전도도를 추정한 결과이다. 이 결과 역시 식 (4)와 같은 제약조건과 함수량이 큰 영역에서는 선형 거동한다는 두 가지의 조건을 동시에 만족시키고 있다.

Fig. 8은 실험자료와 함수량과 상대전기전도도를 추정하기 위하여 제안된 기존의 식들인 Gupta와 Hanks(1972), Mualem과 Friedman(1991), 그리고 본 연구에서 제안한 식을 이용한 추정자료를 비교한 결과인데, 그 결과 본 연구에서 제안한 식이 실험자료에 가장 근접하는 결과를 보이고 있다. 본 연구에서 제안한 식의 정확도를 수치적으로 비교하기 위해 다음 식 (7)을 이용하여 오차율을 계산하였는데, 그 결과는 Table 3과 같다.

$$E(\%) = \frac{\sum_{k=1}^n |\sigma_{ra, m} - \sigma_{ra, p}|}{n} \times 100 \quad (7)$$

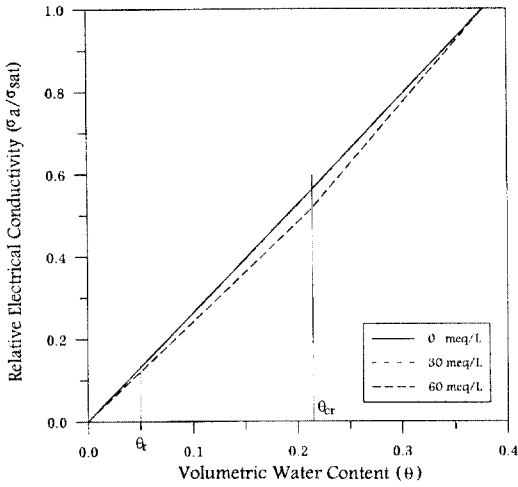


Fig. 5. Relationship between the Relative Bulk Soil Electrical Conductivity and the Volumetric Water Content by using Equation Proposed at Present Study(SUS Soil)

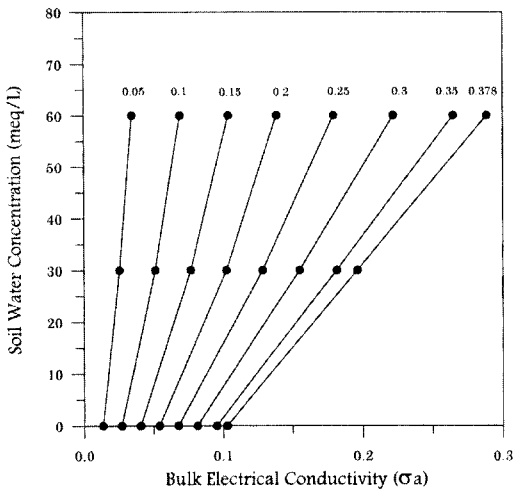
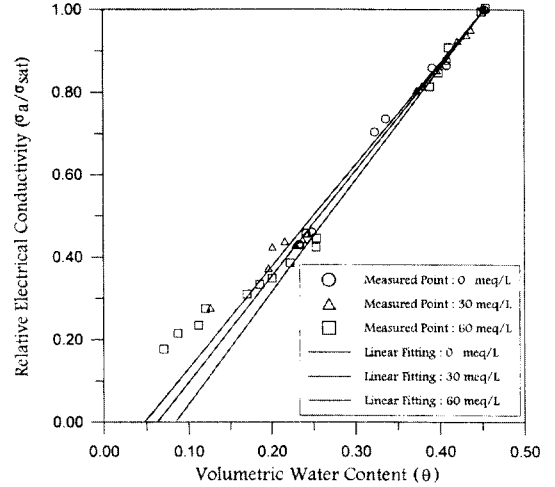
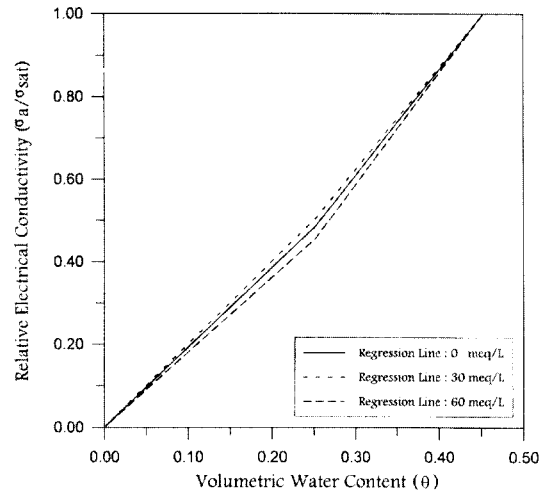


Fig. 6. Relationship between the Bulk Soil Electrical Conductivity and the Soil Water Concentration for Given Water Content by using Equation Proposed at Present Study(SUS Soil)

여기서 $\sigma_{r,m}$ 는 실측된 상대전기전도도이며, $\sigma_{r,b}$ 는 각 연구자들이 제안한 식으로 계산된 상대전기전도도이다. 이 결과에 의하면 모든 구간에 걸쳐 본 논문



(a) By Using Linear Regression



(b) By Using Equation Proposed by Present Study

Fig. 7. Relationship between the Relative Bulk Soil Electrical Conductivity and the Volumetric Water Content(KUS Soil)

서 제안한 식의 오차가 가장 작게 나타나고 있다. 특히, 오염원 농도측정에 있어 양적으로 가장 많은 영향을 미치는 $\theta_{cr} \leq \theta \leq \theta_s$ 영역에서의 오차율이 현저히 줄었으며, $0.15 \leq \theta \leq \theta_{cr}$, $\theta_r \leq \theta \leq 0.15$ 구간에서도 상대적으로 좋은 결과를 보여주고 있다.

Table 3. Comparison of Error between Measured Data and Three Proposed Formula

Proposer	Estimated Range	Error(%)			
		Total	$\theta_{cr} \leq \theta \leq \theta_s$	$0.15 \leq \theta \leq \theta_{cr}$	$\theta_r \leq \theta \leq 0.15$
Gupta & Hanks(1972)		4.61	4.37	4.37	5.25
Mualem & Friedman (1991)		16.82	11.81	22.17	20.23
Present Study		1.70	1.31	2.61	1.47

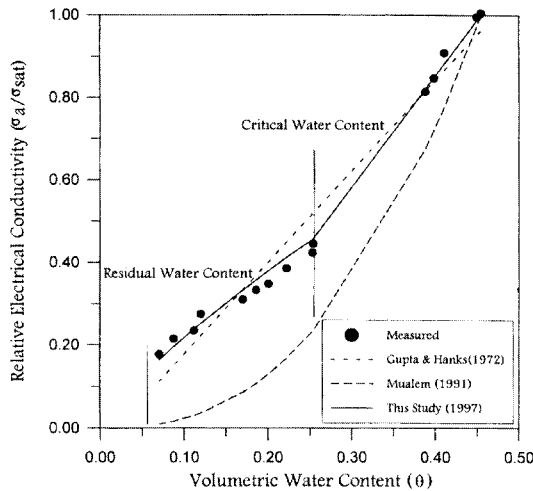


Fig. 8. Comparison of Three Proposed Formula

6. 결 론

비포화 토양에서의 이송확산특성은 지하수 오염원의 거동과 오염의 확산영역을 예측하기 위해 필요한 매우 중요한 특성중 하나이다. 본 연구에서는 TDR을 이용한 비포화 토양에서 오염원의 이송농도를 측정하는 방법을 개발하기 위해 실험을 통하여 함수량과 토양의 전기전도도, 오염원농도와 전기전도도의 관계와 여러 연구자들이 제안한 상대전기전도도 추정식을 검토하였으며, 기존 식들의 한계를 극복하기 위하여 함수량 변화에 따른 상대전기전도도를 추정하는 새로운 식을 제안하였다. 본 연구의 결과는 다음과 같다.

(1) 토양의 총전기전도도 산정을 위하여 Topp 등 (1988)이 제안한 식을 사용하였으며, 전기전도도와 토양수 농도가 선형관계임을 확인하였다.

(2) 함수량과 총전기전도도의 관계를 설명하기 위한 Gupta와 Hanks(1972), Mualem과 Friedman(1991)이 제안한 식을 이용하여 함수량에 따른 상대전기전도도와 토양수농도 관계를 살펴본 결과 농도에 따른 전

기전도도의 개념적 조건을 만족시키지 못하였다.

(3) 함수량과 총전기전도도의 관계를 산정하기 위하여 한계함수량을 이용하는 새로운 식을 제안하였으며, 이 식은 농도에 따른 전기전도도의 개념적 조건을 만족시켰다.

(4) 한계함수량은 상대전기전도도와 함수량의 관계 중 선형관계를 유지하는 최저함수량으로 실험자료와의 상대오차를 최소화하는 경험상수를 구함으로 한계함수량을 결정하게 된다. 이 개념의 도입으로 실험자료의 반영이 증가되어 측정의 정확도를 높일 수 있었다. 실험자료를 이용하여 각 방법들을 비교한 결과 오차율을 1.3%-2.6%사이로 줄일 수 있었다.

(5) 본 연구에서 제안된 전기전도도와 함수량의 관계식은 다른 제안식에 비하여 개선된 결과를 보여주었다. 따라서, 본 연구에서 개발된 한계함수량을 이용한 함수량과 상대전기전도도의 관계는 함수량이 급하게 변하는 천이상태의 오염원 농도 측정에 적용할 수 있는 매우 유용한 방법으로 판단된다.

참 고 문 헌

- 박재현, 윤성용 (1998). "TDR(Time Domain Reflectometry)을 이용한 토양수농도 측정에 관한 연구". 한국수자원학회지, 한국수자원학회, 제 31권, 제1호, pp. 123-132.
- 박재현, 윤성용, 김상준, 선우중호 (1997). "TDR을 이용한 토양함수량의 측정". 한국수자원학회지, 한국수자원학회, 제30권, 제6호, pp. 587-595.
- Dalton, F.N., Herkelrath, W.N., Rawlins, D.S., and Rhoades, J.D. (1984). "Time domain reflectometry : Simultaneous measurement of soil water content and electrical conductivity with a single probe". *Science*, AAAS, Vol. 224, pp. 989-990.
- Gupta, S.C., and Hanks, R.J. (1972). "Influence of water content on electrical conductivity

- of the soil". *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Soil Sci. Soc. Am., Vol. 36, pp. 855-857.
- Heimovaara, T.J. and Bouten, W. (1990). "A computer controlled 36 channel TDR system for monitoring soil water contents". *Water Resour. Res.*, AGU, Vol. 26, pp. 2311-2316.
- 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.
- Keller, G.V., and Frischknecht, F.C. (1966). *Electrical methods in geophysical prospecting*. Pergamon Press, New York.
- Klute, A. (1986). *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. 2nd Ed., Soil Science Society of America.
- Mualem, Y., and Friedman, S.P. (1991). "Theoretical prediction of electrical conductivity in saturated and unsaturated soil". *Water Resour. Res.*, AGU, Vol. 27, No. 10, pp. 2771-2777.
- Nadler, A., Dasberg, S., and Lapid, I. (1991). "Time domain reflectometry measurements of water content and electrical conductivity of layered soil column". *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Soil Sci. Soc. Am., Vol. 55, pp. 938-943.
- Rhoades, J.D., and van Schilfhaarde, J. (1976a). "An electrical conductivity probe for determining soil salinity". *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Soil Sci. Soc. Am., Vol. 40, pp. 647-651.
- Rhoades, J.D., Raats, P.A.C., and Prather, R.J. (1976b). "Effects of liquid phase electrical conductivity, water content, and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity". *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Soil Sci. Soc. Am., Vol. 40, pp. 651-655.
- Rhoades, J.D. (1984). "5.1 Principles and methods of monitoring soil salinity". *Soil Salinity under Irrigation*. Edited by Shainberg, I., Springer-Verlag.
- Rhoades, J.D., Manteghi, N.A., Shouse, P.J. and Alves, W.J. (1989). "Soil electrical conductivity and soil salinity: New formulations and calibrations". *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Soil Sci. Soc. Am., Vol. 53, pp. 433-439.
- Shamir, U.Y., and Harleman, D.R.F. (1967). "Dispersion in layered porous media". *J. Hydraul. Div. Am. Soc. Civ. Eng.*, ASCE, Vol. 93(HY5), pp. 237-260.
- Silliman, S.E. and Simpson, E.S. (1987). "Laboratory evidence of the scale effect in dispersion of solutes in porous media". *Water Resour. Res.*, AGU, Vol. 23, pp. 1667-1673.
- 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 Loon, W.K.P., Perfect, E., Groenevelt, P.H., and Kay, B.D. (1990). "A new method to measure bulk electrical conductivity in soils with Time Domain Reflectometry". *Can. J. Soil Sci.*, Soil Sci. Soc. Canada, Vol. 70, pp. 403-410.
- Yanuka, M., Topp, G.C., Zegelin, S. and Zebchuk, W.D. (1988). "Multiple reflection and attenuation of Time Domain Reflectometry pulses: Theoretical considerations for application to soil and water". *Water Resour. Res.*, AGU, Vol. 24, pp. 939-944.
- Zegelin, S.J., White, I., and Jenkins, D.R. (1989). "Improved field probes for soil water content and electrical conductivity measurement using Time Domain Reflectometry". *Water Resour. Res.*, AGU, Vol. 25, pp. 2367-2376.

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