

TDR(Time Domain Reflectometry)을 이용한 토양수농도 측정에 관한 연구

A Study on the Measurement of Soil Water Concentration by Time Domain Reflectometry

박 재 현* / 윤 성 용**

Park, Jae Hyeon / Yun, Soung Yong

Abstract

Monitoring solute transport has been known to be difficult especially for the unsaturated soil. The object of this study is to investigate the TDR application to monitoring solute concentration in the vadose zone. The TDR calibration test was conducted for soil samples with various water contents and concentrations. The voltage attenuation of electromagnetic wave of TDR was used to estimate the bulk electrical conductivity of a soil. The relationship between the bulk soil electrical conductivity and the solute concentration was assumed to be linear at a constant volumetric soil water content. In this study four proposed relationships were compared using data obtained from KCl solution at three different concentrations. Relationships given by Topp, Dalton, Yanuka showed the linearity between the bulk soil electrical conductivity and the solute concentration, which were more pronounced than Zegelin's. The three relationships were found to be useful to measure the solute concentration in the vadose zone. In addition, TDR method was proven to be a viable technique in monitoring solute transport through unsaturated soils in transient flow condition.

Keywords : TDR, bulk soil electrical conductivity, solute concentration, volumetric soil water content, vadose zone

요 지

비포화대에서의 지하수 오염원의 이송을 관측하는 것은 매우 어려운 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 함수량과 농도가 다른 시료를 이용하여 비포화 용존 오염원의 농도를 측정하기 위한 TDR의 적용가능성에 대한 검증실험을 수행하였다. 초기전자기파에 대한 TDR반향파의 감쇄정도를 이용하여 토양의 총전기전도도를 측정하게 되는데 이때 함수량이 일정할 경우 총전기전도도와 토양수의 농도관계는 선형관계를 유지한다는 가정을 기본으로 한다. 본 연구에서는 세가지의 농도와 체적함수량을 갖는 시료를 성형하고 이 때의 TDR반향곡선을 측정하여 Dalton 등 (1984), Topp 등 (1988), Yanuka 등 (1988), Zegelin 등 (1989)이 제안한 추정식으로 총토양전기전도도를 구하였다. 실험결과 Zegelin 등이 제안한 식을 제외한 세 가지 식들은 매우 좋은 토양수의 농도와 총전기전도도의 선형관계를 나타내었다. 따라서 이 세가지 추정식들은 용존 오염원의 농도를 추정함에 있어 매우 유용한 식으로 판단되며 이 추정식들을 이용하는 TDR 비포화 용존 오염원 측정법은 실내실험과 현장실험에 있어 매우 유용하리라 판단된다.

핵심용어 : 비포화대, TDR, 총전기전도도, 토양수농도, 체적함수량

* 서울대학교 공학연구소 특별연구원

** 안산공업전문대학 조교수

1. 용존 오염원농도를 측정하는 새로운 방법의 모색

쓰레기 매립장에서 배출되는 침출수와 농약이나 비료 등의 화학적 오염원에 의하여 지하수가 광범위하게 오염되고 있다. 이러한 오염문제를 해결하기 위하여 오염원이송에 대한 많은 연구들이 수행되어져 왔다. 지하수의 오염원이송에 관한 초기 연구자들(van Genuchten과 Wierenga, 1977; Tyler와 Thomas, 1981; Schulin 등, 1987; Seyfried와 Rao, 1987)은 흡기등을 성형하여 수행한 실내실험에 초점을 두었지만, 최근 연구자들(Jury 등, 1982; Butters 등, 1989; Ellsworth 등, 1991; Kim, 1996a,b)은 현장의 오염원 추적이나 예측에 관한 중요성을 인식하고 이를 연구하고 있다. 이러한 연구를 수행함에 있어 오염원의 이송에 관한 관측은 오염원의 거동을 예측하는데 있어 가장 기본이 되는 과업이 된다. 이를 위해 오염원을 함유하고 있는 토양수를 채취하고 이를 분석하여 시간과 공간변화에 따른 오염원의 농도변화를 측정하게 된다. 이때 토양수를 채취하기 위하여 사용되는 가장 일반적인 방법은 진공시료흡입법(suction sampler technique)이 있다. 진공시료흡입법은 토양수 채취기(soil water sampler, suction lysimeter, lysimeters)라는 장치를 이용하게 된다. 이 장치는 분체에 해당하는 튜브에 다공성암(ceramic cup)을 부착하고 여기에 막대와 연결호스를 이용하여 진공펌프에 연결한 장치이다. 이 장치를 토양속에 설치하고 진공펌프를 이용하여 토양수채취기 내에 진공을 걸어주게 되면 다공성암을 통하여 전달된 진공압력에 의하여 비포화 상태에 있는 토양수가 토양수채취기로 흡입되게 된다.

이 방법을 이용하여 토양수를 채취할 때 발생하는 가장 큰 단점은 토양수 채취기에 가해지는 높은 진공압력으로 인해 채취기 부근의 유선이 교란되는 것이다(van der Ploeg와 Beese, 1977). 이뿐만 아니라 작은 규모의 실내실험에서 토양수를 채취하게되면 총토양수에 대한 채취된 토양수의 비율이 상대적으로 높게 되어 질량보존(mass balance)을 고려하기가 어려워진다. 또한 토양수 채취기는 포화된 다공성암에 부압을 걸어주어 지표와의 압력차로 토양수를 채취기 내부로 끌어들이는 방법이기 때문에 토양수의 모세관압력이 될 경우(함수량이 작은 경우) 토양수를 채취하기가 어렵다. 이외에도 토양수채취기는 토양수를 채취하는 시간이 많이 소요되기 때문에 전이상태(transient

state)의 오염원농도를 측정하는 장치로는 바람직하지 못하다(Ward 등, 1994). 본 연구에서는 이러한 토양수채취기의 한계를 극복하기 위하여 개발된 TDR(time domain reflectometry)을 소개하고 오염원농도를 측정하는데 제한된 관계식들을 실내실험을 통하여 고찰하고자 한다.

2. TDR을 이용한 토양내 오염원농도 측정원리

TDR을 이용하여 토양내 함수량을 측정하는 방법은 임피던스변화에 따른 반향성과 이 사이를 흐르는 전자기파의 속도와 유전율 변화의 관계를 이용한다(박재현 등, 1997). 반면에 TDR을 이용하여 토양내 오염원의 농도를 측정하는 방법은 반향되는 전자기파의 크기(voltage)를 이용하게 된다. 토양내에서 오염원의 농도가 변하면 토양의 저항, 임피던스가 변하기 때문에 TDR의 탐침을 통하여 반향되는 전자기파의 크기는 토양내의 농도의 변화에 따라 반향정도를 달리하게 된다. 이 때 반향되어 오는 전자기파의 크기 변화를 분석하여 토양내 임피던스의 변화를 측정하고 임피던스의 변화로부터 총토양전기전도도(bulk soil electrical conductivity, σ_b)를 추정하게 된다.

오염원의 농도변화에 의하여 총토양전기전도도가 다르게 분포할 경우, 토양에 대한 전자기파의 반향특성은 다음과 같이 요약될 수 있다. 총전기전도도가 증가하게 되면 임피던스를 구성하는 저항이 낮아지므로 토양에 설치되어 있는 TDR 탐침근처의 임피던스는 감소하게 되고 토양의 유전효과에 의하여 탐침을 따라 흐르는 전자기파의 전압이 감소하게 된다. 따라서 TDR 탐침을 따라 반향되는 전자기파의 전압을 분석하면 총전기전도도가 높은 토양은 전기전도도가 낮은 토양에 비하여 반향곡선의 뒷부분이 아래로 처지게 된다(Evett, 1996). 즉, 유입 전자기파의 전압과 반향되어 나오는 전자기파의 상대적 전압차는 토양수(soil solution)내의 농도변화를 의미하게 된다.

TDR을 이용한 용존 오염원의 농도측정법은 이온의 전기전도특성을 이용한다. 방법이기 때문에 용존되어 이온화 되는 오염원에 대하여 측정이 가능함대 전기전도도가 너무 커지면 반향파의 감쇄정도를 이용하여 농도를 측정하기 어려워지므로 TDR을 이용한 농도측정의 한계를 CaCl_2 6g/L로 제시하기도 한다(van Loon 등, 1990). 농도차에 의한 전자기파의 반향특성을 알아보기 위하여 염화칼륨(KCl) 농도가 0 meq/L, 30 meq/L, 60 meq/L로 형성된 시료를 측정하여 반

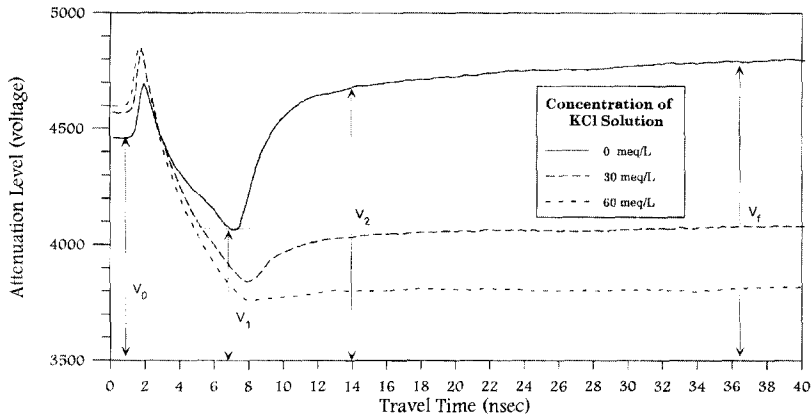


Fig. 1. Characteristics of the TDR Attenuation Signal Level for Concentration

향곡선의 형태를 살펴보았다. 농도변화에 따른 반향곡선의 형태를 Fig. 1에 나타내었다. 여기서 V_0 는 진압하는 전자기파의 전압, V_1 은 반향되는 지점의 최저전압, V_2 는 반향이 지나고 난 후의 전자기파가 가지고 있는 전압, V_f 는 상당한 시간(반향시간의 10배에 해당하는 시간)이 지난 후의 전자기파가 가지고 있는 전압에 해당한다. Fig. 1에서 보듯이 최상단의 곡선이 0 meq/L이며 농도가 증가하면서 곡선이 아래로 처지게 되는데 가운데 곡선이 30 meq/L, 제일 하단의 곡선이 60 meq/L을 나타낸다. 즉 전자기파의 반향곡선은 농도가 증가할수록 반향곡선의 뒷 부분이 아래로 처지게 되는데 이는 반향후 전자기파의 전압이 낮아진다는 의미이다.

TDR을 이용하여 토양의 특성을 관측할 때 반향파의 전파속도는 TDR 출력부분의 시간축(time axis)에 표시되며 파에너지의 감소정도는 반향상수축(reflection coefficient axis)에 표시된다. 전자기파의 반향시간으로부터 유전율상수를 구하기 위하여 Topp 등(1980)은 식 (1)을 사용하였다.

$$v = \frac{c}{\sqrt{K}} \quad (1)$$

여기서 $v (= 2L/t_r)$ 는 매질에서 전자기파의 전진속도(m/s)를 의미하며, c 는 진공에서의 전자기파의 속도(3×10^8 m/s)를 의미한다. K 는 유전율상수의 실수부(real part), L 은 탐침의 길이(m), t_r 는 탐침길이를 통과하는 전자기파의 통과시간(sec)이다. 탐침의 고유한 임피던스를 Z_0 라 할 때 탐침을 관측한 매질에 설치하면 그 매질에서의 임피던스 Z_s 는 식 (2)와 같이

표시할 수 있다(Kraus, 1991).

$$Z_s = \frac{Z_0}{\sqrt{K}} \quad (2)$$

이상적인 동축선(ideal coaxial transmission line)의 고유한 임피던스 Z_0 는 Fig. 2에서와 같이 오직 전선의 기하학적 형태에 의하여 결정되는데 Kraus(1991)는 식 (3)과 같은 식을 제안하였다.

$$Z_0 = 60 \ln\left(\frac{2s}{d}\right) \quad (3)$$

여기서 $2s$ 는 바깥쪽 유전체(outer conductor)의 지름을 의미하며, d 는 안쪽 유전체(inner conductor)의 지름을 의미한다. 본 연구에서 사용한 3선식 탐침의 고유임피던스를 구하려면 가운데 탐침의 지름을 d , 양쪽 두선 간격을 $2s$ 로 하여 계산하면 된다.

탐침이 토양에 설치되어 있을 경우 전자기파가 동축선을 통하여 전달되다가 토양에 도착하면 임피던스의 차이가 발생하여 파의 반향이 발생한다. 이 때 전압반향계수(voltage reflection coefficient)는 아래의 식 (4)와 같다(Kraus, 1991).

$$\rho = \frac{(Z_s - Z_0)}{(Z_s + Z_0)} \quad (4)$$

여기서 Z_s 는 탐침이 토양에 설치되었을 때 탐침 근처의 임피던스를 의미하며, Z_0 는 동축선의 임피던스를 의미한다. 이 때의 전송계수(transmission coefficient) T 는 다음 식 (5)와 같다(Kraus, 1991).

$$T = (1 + \rho) \quad (5)$$

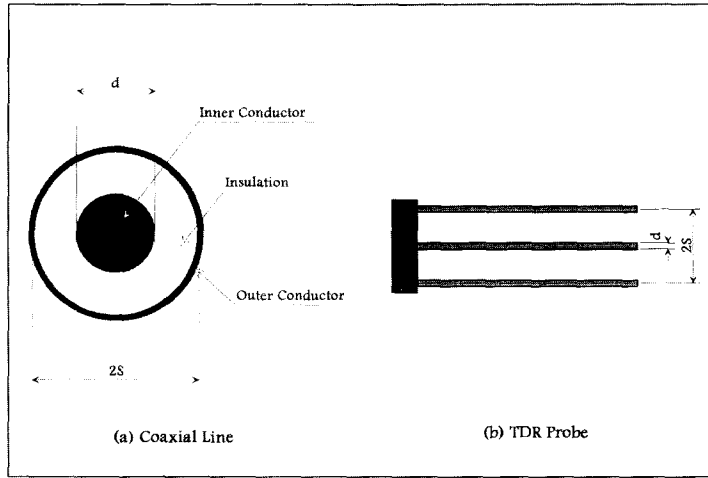


Fig. 2. Characteristic Impedance for Coaxial Line & TDR Probe

Yanuka 등(1988)은 식 (6)과 같은 개회로(open circuit)로 끝나는 균질한 전도토양(conductive soil)에 대한 전파식을 개발하였다.

$$V_2 = V_o(1 + \rho) + V_o(1 - \rho^2)f^2 \quad (6)$$

여기서 V_o 는 탐침으로 진입한 입력전압이며, V_2 는 탐침을 지나 반향되어 나온 반향파의 전압이다. f 를 감쇄요소(attenuation fraction)라 하는데 감쇄요소란 전자기파가 토양이나 용액을 통과하며 발생하는 에너지의 감쇄정도를 말하며 Yanuka 등(1988)은 Kraus (1991)가 제안한 식 (7)을 감쇄요소로 사용하였다.

$$f = \exp(-\alpha_a L) \quad (7)$$

여기서 L 은 탐침의 길이에 해당하며, α_a 를 감쇄상수(attenuation constant)라 하는데 Yanuka 등(1988)은 $(K'' + \sigma_{dc}/\omega \epsilon_o) \ll K'$ 라는 가정하에 감쇄상수로 아래와 같은 식 (8)을 제안하였다.

$$\alpha_a = 60 \pi \frac{(\omega \epsilon_o K'' + \sigma_{dc})}{\sqrt{K'}} \quad (8)$$

여기서 ω 는 전자기파의 진동수 ($\approx 6 \times 10^7 \sim 6 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$), ϵ_o 는 진공상태의 유전율(permittivity, dielectric constant; $8.85 \times 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$), σ_{dc} 는 직류 전기전도도(s/m)이며, K' , K'' 는 $K_a = K' j(K'' + \sigma_{dc}/\omega \epsilon_o)$ 로 표시되는 매질의 유전율상수의 실수부와 허수부이다. Topp 등(1988)은 감쇄상수중 $(\omega \epsilon_o K'' + \sigma_{dc})$ 를 TDR에 의해 측정되어지는 유효전기전도도(effective

electrical conductivity, σ_T)로 정의하였는데 이는 식 (9)와 같다.

$$\sigma_T = \omega \epsilon_o K'' + \sigma_{dc} \quad (9)$$

TDR을 이용하여 측정되어지는 유효전기전도도 σ_T 는 식 (6), 식 (7), 식 (8)을 이용하여 식 (10)과 같이 정리할 수 있다.

$$\sigma_T = \frac{\sqrt{K'}}{120\pi L} \ln \left(\frac{V_1(2V_0 - V_1)}{V_o(V_2 - V_1)} \right) \quad (10)$$

TDR의 반향파선의 형태로부터 유효전기전도도를 추정하는 방법은 여러 연구자들에 의해 제안되고 있으며 대표적인 제안식을 다음 Table 1에 정리하였다. 이들 추정식은 토양의 유전율상수와 반향전압에 의하여 결정된다. 앞에서 설명한 바와 같이 유전율상수는 토양내 함수량을 결정하는 중요한 변수이다. Nadler 등(1991)은 균질한 Gilat silt loam을 이용하여 토양의 전기전도도가 다른 상태에서 유전율상수와 함수량에 관한 관계를 연구하였다. 전기전도도가 다른 토양시료를 구성하기 위하여 토양시료에 증류수, NaCl 용액, CaCl₂ 용액을 가하였는데 TDR을 이용하여 측정한 유전율상수와 실제 함수량의 관계($K_a - \theta$)를 구한 결과에 의하면 염도(salinity)의 잔류성도(전기전도도의 차이)는 유전율상수와 함수량의 관계에 영향을 주지 않음을 알 수 있다. 또 유전율상수와 함수량의 관계에 Topp 등(1980)이 제안한 식을 적용한 결과 타당성이 있음을 보여주고 있다.

Table 1. Proposed Approximation Formula for Electrical Conductivity by Using TDR Attenuation Voltage(Nadler et al., 1991)

Proposer	Approximation formula
Dalton et al. (1984)	$\sigma_D = \frac{\sqrt{K_a}}{120\pi L} \ln\left(\frac{V_1}{V_2 - V_1}\right)$
Topp et al. (1988)	$\sigma_T = \frac{\sqrt{K_a}}{120\pi L} \ln\left(\frac{V_1(2V_0 - V_1)}{V_0(V_2 - V_1)}\right)$
Yanuka et al. (1988)	$\sigma_Y = \frac{\sqrt{K_a}}{120\pi L} \ln\left(\frac{V_1 V_f - V_0(V_1 + V_f)}{V_0(V_1 - V_f)}\right)$
Zegelin et al. (1989)	$\sigma_Z = \frac{\sqrt{K_a}}{120\pi L} \frac{V_1}{V_f} \left(\frac{2V_0 - V_f}{2V_0 - V_1}\right)$

V_0 : Amplitude of TDR pulse

V_1 : Signal after partial reflection from start of probe

V_2 : Signal after partial reflection from end of probe

V_f : Reflected signal after a very long time

σ_D : Approximation formula for bulk electrical conductivity proposed by Dalton

σ_T : Approximation formula for bulk electrical conductivity proposed by Topp

σ_Y : Approximation formula for bulk electrical conductivity proposed by Yanuka

σ_Z : Approximation formula for bulk electrical conductivity proposed by Zegelin

3. 전기전도도와 토양수 농도의 관계

토양의 전기전도도를 이용하여 농도를 계산하는데 있어 가장 기본적인 가정은 '일정한 함수량에서 토양내 용액농도와 전기전도도는 선형적 거동을 한다'는 것이다 (Kachanoski 등, 1992). 이 가정을 일정한 함수량에서 토양내 용액농도와 전기전도도의 관계를 표현하면 식 (11)과 같다.

$$C = A\sigma_a + B \quad (11)$$

여기서 C 는 토양수의 농도(meq/L), σ_a 는 토양의 총전기전도도(bulk soil electrical conductivity, s/m), A , B 는 경험상수이다. 총전기전도도(σ_a)는 고체상(solid phase of soil)에 의한 전기전도도(σ_s)와 액체상(liquid phase of soil, soil solution)에 의한 전기전도도(σ_w) 등 두 가지의 전도요소(conducting element)에 의하여 구성되어 있는데 그 관계는 식 (12)와 같다(Rhoades, 1984; Rhoades 등, 1989).

$$\sigma_a = \sigma_s + T\theta\sigma_w \quad (12)$$

$$T = a\theta + b \quad (13)$$

T 는 토양용액내의 입자와 입자 사이를 흐르는 토양

수의 복잡한 기하학적 배열에 의하여 발생하는 임피던스의 비틀림정도(tortuosity)를 조정해주는 전송계수(transmission coefficient, ≤ 1), θ 는 부피토양함수량이다. 여기서 σ_s 와 T 는 토양의 특성에 의하여 결정되어지는 인자인데 특히 T 는 함수량에 의해 영향을 받는다. T 는 식 (13)과 같이 표현되며, σ_s 는 토양특성에 의하여 결정되므로 특정토양의 총토양전기전도도는 식 (14)와 같은 함수량과 토양수의 전기전도도의 선형함수로 표시할 수 있다(Rhoades, 1984).

$$\sigma_a = \sigma_s + (a\theta^2 + b\theta)\sigma_w \quad (14)$$

만약 함수량이 일정하다면 총토양전기전도도는 식 (15)와 같다.

$$\sigma_a = A'\sigma_w + B' \quad (15)$$

여기서, $A' = (a\theta^2 + b\theta)$, $B' = \sigma_s$ 이며 이 관계를 식 (11)에 적용하면 총전기전도도와 토양수의 농도가 선형관계로 설명될 수 있다. Table 1에서 제시된 TDR의 반향곡선의 형태로부터 유효전기전도도를 추정하는 식을 이용하여 일정한 함수량에 대한 총전기전도도를 측정할 수 있는데 총전기전도도와 토양농도의 선형관계를 이용하면 농도를 추정할 수 있다.

4. 오염원농도 측정을 위한 TDR 검정실험 (calibration test)

토양의 충전기전도도는 함수량이 일정할 경우 토양수 농도에 대하여 선형기동을 보임을 살펴보고있는데 토양 기동시료에서 TDR을 이용한 농도변화 추적을 위하여는 식 (11)을 구성하고 있는 함수량에 따른 선형매개 변수를 실험을 통하여 추정하여야 한다. 이를 위하여 토양기동시료를 성형하여 오염원 농도추정을 위한 TDR의 검정실험을 수행하였다. 선형매개변수를 추정하기 위한 검정실험에서 사용한 오염원의 농도는 KCl 수용액 0 meq/L, 30 meq/L, 60 meq/L 등이다.

4.1 검정을 위한 실험장치 및 실험방법

토양기동시료에서 TDR을 이용한 농도변화 추적을 위하여는 식 (11)과 같이 각 함수량에서 총토양전기전도도와 토양수 농도의 관계를 실험하여야 한다. 이를 위하여 내부시료용기, 외부시료용기, 공기압축기, 진공 펌프 등으로 구성되는 함수량조절장치를 개발하였다.

내부용기는 아크릴재질로 내경 100 mm, 길이 230 mm 인 파이프 하단에 나공성판을 부착시킨 것으로 여기에 230 mm 길이의 토양시료를 채우게 된다. 외부용기는 아크릴재질로 내경 115 mm, 길이 300 mm인 파이프로 상단과 하단에 아크릴판을 부착시켜 진공과 압력을 걸어 줄 수 있게 설계되었다. 이 장치를 이용하여 함수량을 조정하게 된다. 실험장치의 개략도를 Fig. 3에 나타내었다. 본 실험에 사용한 토양은 서울시 관악구

신림동에 소재한 서울대학교내 나대지에서 채취한 토양으로 국제토양학회법이나 미국농무부에 의해 제안된 토성분류법(삼각도표법)에 의해 분류된 토성은 미사가 4%, 세사가 8%, 조사가 88%로 사토(sand)에 해당한다. 오븐건조를 통하여 측정된 포화함수량 (saturated volumetric water content, θ_s)은 0.378이다. TDR 검정을 위한 실험은 다음과 같이 진행되었다.

(1) 3개의 내부용기에 동일한 토양시료를 채운 후 외부용기에 넣고 밀봉한다. 외부용기에 진공을 걸어주면서 KCl용액(0 meq/L, 30 meq/L, 60 meq/L)을 가하면 내부용기의 토양은 완전포화토양이 된다.

(2) 포화된 내부용기내 토양에 TDR을 설치하여 포화함수량에서 토양의 충전기전도도를 측정한다 (Fig. 4 참조).

(3) 다시 외부용기를 밀봉한 후 일정한 압력으로 오렌지간을 유지하면 토양내 물이 배수되므로 일정한 시간이 지난 후 내부용기의 토양에 TDR을 설치하여 감소한 함수량에 대한 토양의 충전기전도도를 측정한다.

(4) 압력을 증가 시키면서 (3)의 과정을 반복하면 여러 함수량에 대한 토양의 충전기전도도를 측정할 수 있다. 밀봉한 용기내에 압력을 걸어주어 토양내의 물을 배수하는 방법은 체적기압판추출장치 (volumetric pressure plate extractor)를 이용하여 불보유함수를 측정하는 방법(윤성용 등, 1997)과 동일한 원리를 이용한 것인데 이 때의 배수속은 자연배수이므로 비포화부수계수를 고려할 때 내부용기의 함수량이 일

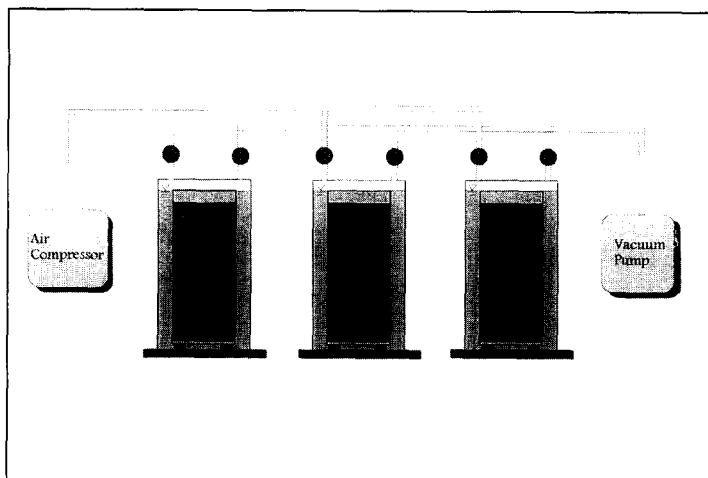


Fig. 3. Apparatus for Adjusting Soil Water Content

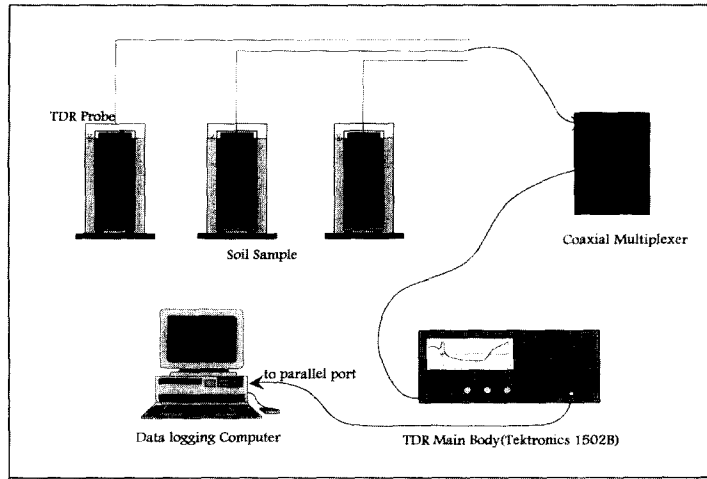


Fig. 4. TDR Calibration Test to Measure Solute Concentration

정한 상태에 이르기 위하여는 상당기간이 경과하여야 한다. 본 실험에서는 1기압단위의 압력을 3기압까지 걸어 주었고 배수시간은 24시간으로 하였다. 24시간 안에 내부도양이 균일한 함수량에 이르지는 않지만 TDR은 탐침주위의 평균값을 측정하므로 평균 함수량에 대한 평균 충전기전도도가 측정된다.

4.2 검정실험 결과

Table 1에서 제안한 토양충전기전도도 공식을 이용하여 일정한 함수량에서 토양충전기전도도와 토양수의 농도를 조사한 결과를 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 5는 Table 1에서 각 연구자들이 제안한 식을 비교하기 위하여 포화함수량에서의 토양의 충전기전도도와 토양수 농도와의 관계를 나타낸 것으로 토양의 충전기전도도와 토양수의 농도는 선형관계를 유지하고 있음을 알 수 있다. 하지만 Zegelin의 추정식을 이용한 결과 다른 식에 비하여 선형성이 떨어졌다.

비포화영역에서 오염원이 천이상태를 유지하며 이동할 때 시간과 공간에 따라 함수량과 오염원의 농도가 함께 변하므로 함수량이 변화에 따라 토양의 충전기전도도와 토양수 농도와의 관계를 설명하는 매개변수도 변화하여야 한다. Fig. 6은 함수량이 다른 경우 토양의 충전기전도도와 토양수 농도의 관계를 설명하는 것이다. Fig. 6을 살펴보면 함수량에 따라 식 (11)을 구성하는 매개변수 A , B 가 변한다. 따라서 매개변수 A , B 를 함수량에 관한 함수 $A(\theta)$, $B(\theta)$ 로 표시할 수 있다. 각 함수량에 따른 매개변수의 값을 Table 2와

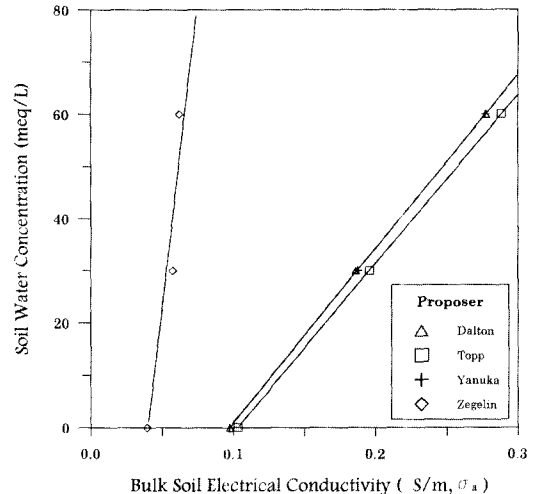


Fig. 5. Relationship between the Bulk Soil Electrical Conductivity and the Soil Water Concentration at Saturated Water Content

Table 3에 수록하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 TDR을 이용한 천이상태의 비포화 용존 오염원의 농도를 측정하는 방법의 적용가능성을 확인하기 위하여 용존 오염원의 농도 측정을 위한 TDR 기기의 검정실험을 수행하였다. TDR을 이용하여 용존오염원의 농도를 측정하는 방법은 토양의 충전

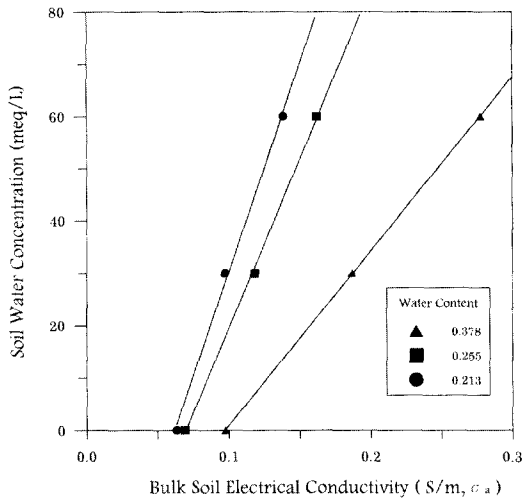


Fig. 6(a). Relationship between the Bulk Soil Electrical Conductivity and the Soil Water Concentration by Dalton's Formula

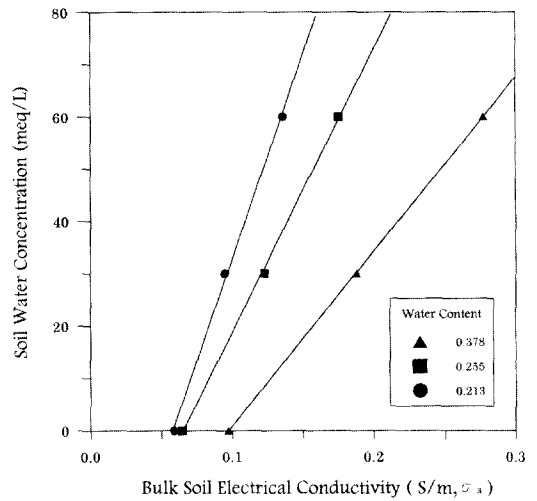


Fig. 6(c). Relationship between the Bulk Soil Electrical Conductivity and the Soil Water Concentration by Yanuka's Formula

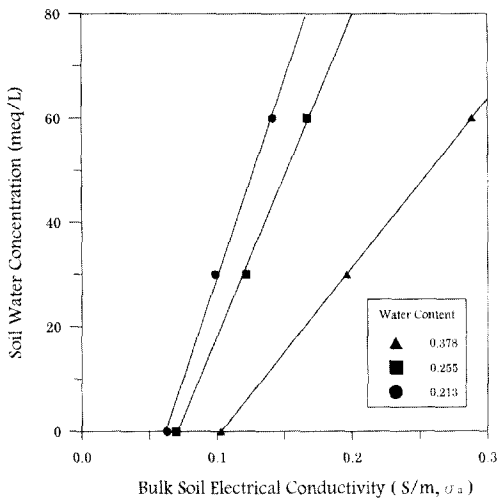


Fig. 6(b). Relationship between the Bulk Soil Electrical Conductivity and the Soil Water Concentration by Topp's Formula

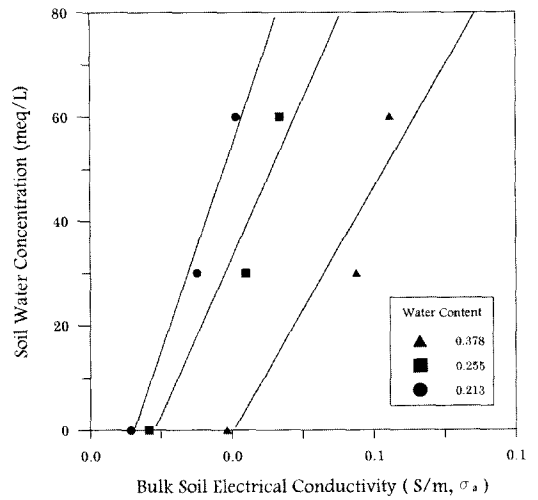


Fig. 6(d). Relationship between the Bulk Soil Electrical Conductivity and the Soil Water Concentration by Zegelin's Formula

기전도도와 토양수의 농도관계를 이용하는데 여기에는 함수량이 일정할 경우 토양수의 농도와 토양총전기전도도는 선형관계를 한다는 가정을 기본으로 하였다. 이를 위하여 본 연구에서는 농도와 함수량이 다른 시

료를 선정하고 이 때의 TDR반향곡선을 측정하여 Dalton 등(1984), Topp 등(1988), Yanuka 등(1988), Zegelin 등(1989)이 제안한 추정식으로 토양의 총전기전도도를 구하였다. 그 결과 Zegelin 등이

Table 2. Parameters $A(\theta)$ for Estimating Concentration by Electrical Conductivity

$A(\theta)$	θ		
	0.378	0.255	0.213
Dalton et al.(1984)	332.76	645.48	794.69
Topp et al.(1988)	323.44	614.86	761.55
Yanuka et al.(1988)	333.29	540.04	770.06
Zeglin et al.(1989)	2343.82	3022.60	3950.08

Table 3. Parameters $B(\theta)$ for Estimating Concentration by Electrical Conductivity

$B(\theta)$	θ		
	0.378	0.255	0.213
Dalton et al.(1984)	-32.35	-45.15	-49.29
Topp et al.(1988)	-33.38	-43.45	-46.99
Yanuka et al.(1988)	32.47	-35.26	-44.95
Zeglin et al.(1989)	94.26	87.94	-103.59

제한한 식을 제외한 3가지 식들은 토양수의 농도와 토양충전기전도도가 선형관계를 잘 나타내 주고 있음을 알 수 있었으며 함수량에 따른 토양수의 농도와 토양의 충전기전도도 관계를 구하였다. 이러한 결과들을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 충전기전도도를 추정하는 4가지의 식을 비교한 결과 Zeglin이 제한한 식은 다른 식에 비하여 선형성이 떨어진다.

(2) 추정식들을 통하여 계산되는 충전기전도도의 절대값에는 차이를 보이지만 각 함수량에 관한 충전기전도도의 상대적비율은 일관성을 유지하므로 충전기전도도와 토양수 농도의 관계를 규명하는데 Dalton 등, Topp 등, Yanuka 등의 어떠한 추정식을 사용하여도 무난하다고 판단된다. 하지만 각 함수량에 대한 충전기전도도를 구할 경우 동일한 추정식을 사용하여야만 한다.

본 연구를 통하여 토양의 충전기전도도와 토양수 농도의 관계에 대한 TDR 검증실험을 수행하였는데 Dalton 등, Topp 등, Yanuka 등의 제한식들은 용존 오염원의 농도추정에 있어 적용성이 좋은 식이라 판단된다. 뿐만아니라 식 (11)과 같은 선형관계를 만족하는 배개변수가 함수량에 관한 함수로 표시된다면 친이상태의 비포화흐름과 오염원이송을 추정함에 있어 매우 유용하게 사용될 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

박재현, 윤성용, 김상준, 선우중호 (1997). "TDR을 이용한 토양함수량의 측정." *한국수자원학회지*, 제 30권, 제6호, pp. 583-591.

윤성용, 박재현, 김상준, 선우중호 (1997). "Volumetric Pressure Plate Extractor를 이용한 물보유함수 측정." '97년 *한국수자원학회 학술발표회 논문집*, pp. 471-474.

Butters, G.L., Jury, W.A. and Ernst, F.F. (1989). "Field scale transport of bromide in an unsaturated soil, 1. Experimental methodology and results." *Water Resour. Res.*, Vol. 25, pp. 1575-1581.

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*, Vol. 224, pp. 989-990.

Ellsworth, T.R., Jury, W.A., Ernst, S.S. and Shouse, P.J. (1991). "Three-dimensional field study of solute transport through unsaturated layered porous media, 1. Methodology, mass recovery, and mean transport." *Water Resour. Res.*, Vol. 27, pp. 951-965.

Evelt, S.R. (1996). *Algorithms for determination of travel times from TDR wave form*. USDA-ARS, Conservation & Production Research Lab.

Jury, W.A., Stolzy, L.H. and Shouse, P. (1982). "A field test of the transfer function model for predicting solute transport." *Water Resour. Res.*, Vol. 18, pp. 369-375.

Kachanoski, R.G., Pringle, E. and Ward, A. (1992). "Field measurement of solute travel times using Time Domain Reflectometry." *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 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." *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." *Econ Environ. Geol.*, Vol. 29, No. 6, pp. 713-724.
- Kraus, J.D. (1991). *Electromagnetics*, 4th ed., McGraw-Hill, New York.
- 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.*, Vol. 55, pp. 938-943.
- Rhoades, J.D. (1984). "Principles and methods of monitoring soil salinity." Chapter 5.1, *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.*, Vol. 53, pp. 433-439.
- Schulin, R., Wierenga, P.J., Flühler, H. and Leuenberger, J. (1987). "Solute transport through a stony soil." *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 51, pp. 36-42.
- Seyfried, M.S. and Rao, P.S.C. (1987). "Solute transport in undisturbed columns of an aggregated tropical soil: Preferential flow effects." *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 51, pp. 1434-1443.
- Topp, G.C., Davis, J.L. and Annan, A.P. (1980). "Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines." *Water Resour. Res.*, Vol. 16, pp. 574-582.
- Topp, G.C. and Davis, J.L. (1985). "Time domain reflectometry(TDR) and its application to irrigation scheduling." *Advances in irrigation*, Vol. 3, Edited by Daniel Hillel, Academic, New York.
- 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.*, Vol. 24, pp. 945-952.
- Tyler, D.D. and Thomas, G.W. (1981). "Chloride movement in undisturbed soil column." *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 45, pp. 459-461.
- van der Ploeg, R.R. and Beese, F. (1977). "Model calculation for the extraction of soil water by ceramic cups and plates." *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 41, pp. 466-470.
- van Genuchten, M.Th. and Wierenga, P.J. (1977). "Mass transfer studies in sorbing porous media. II. Experimental evaluation with tritium." *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 41, pp. 272-278.
- 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.*, Vol. 70, pp. 403-410.
- 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.*, Vol. 58, pp. 1031-1039.
- 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.*, 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.*, Vol. 25, pp. 2367-2376.

<최종본 접수일 : 1998년 1월 8일>