

TDR(Time Domain Reflectometry)을 이용한 토양함수량의 측정

Measurement of Soil Water Content by Time Domain Reflectometry

박재현* / 윤성용** / 김상준*** / 선우중호****

Park, J.H. / Yun, S.Y. / Kim, S.J. / Sonu, J.H.

Abstract

Experimental study on unsaturated flow in the soil is important to understand the characteristics of the water flow. Measurement of unsteady-state water movement using the traditional equipment (e.g. tensiometer) has a problem that requires relatively a long response time. In this study a quick measurement method of soil water flow using TDR is introduced. TDR consists of an electronic function generator which generates a squared wave, and an oscilloscope which catches the reflected wave. The wave is reflected where both the impedance of the transmission line and the propagation velocity are changed. The water content can be obtained from the travel time measured by means of TDR because the dielectric constant is affected by the change of soil water content. From the result of TDR calibration, TDR measurement error for the oven dried soil was found to be less than 3.5%. This supports that TDR is a viable technique to measure the unsteady-state water movement.

Keywords: TDR, reflection, propagation velocity, impedance, dielectric constant

요 지

비포화 흐름에 관한 실험은 토양내 물의 이동특성을 밝히는 매우 중요한 의미를 가지고 있다. 하지만 Tensiometer와 같은 전통적인 측정방법은 측정시간이 비교적 길기 때문에 함수량이 급격하게 변하는 비정상류 비포화흐름을 측정하는데 상당한 어려움이 따른다. 본 연구에서는 TDR을 이용하여 이러한 문제를 해결할 수 있는 함수량 측정방법을 소개하고자 한다. TDR은 구형파를 발생시키는 함수발생기와 반향파를 분석하는 오실로스코프로 구성되어 있다. 토양속에 설치된 탐침을 지나는 구형파는 임피던스가 변하는 지점에서 반향되며 주변토양의 유전율상수 변화에 따라 전파속도가 달라지게 된다. 이 때 토양내 함수량은 함수량에 따른 반향시간특성을 이용하여 추정되어진다. TDR을 이용하는 함수량측정의 검증실험에 의하면 오븐 건조한 함수량에 대한 TDR측정 함수량의 오차율이 3.5% 이내 이었다. 따라서 TDR은 국내토양에 대한 비정상류 상태의 비포화흐름을 측정하는데 매우 훌륭한 실험장치로 판단된다.

핵심용어: TDR, 반향, 전파속도, 임피던스, 유전율 상수

-
- * 서울대학교 토목공학과 박사과정 수료
 - ** 안산공업전문대학 토목공학과 전임강사
 - *** 경원대학교 토목공학과 전임강사
 - **** 서울대학교 총장

1. 서 론

최근들어 지하수 이용의 증가에 따른 지하수자원의 양적, 질적관리의 중요성이 사회적으로 심각하게 인식되고 있다. 지하수자원 관리를 위해 해결해야할 중요한 연구과제중 하나는 지하수원으로 침투(infiltration), 침투(percolation)되는 지표오염원의 경로 및 오염된 지하수의 이동과정을 규명하는 것이다. 오염원의 이동과정은 크게 포화대에서의 이동과 비포화대에서의 이동으로 나눌 수 있는데, 특히 지하수원으로 침투, 침투되는 지표오염원은 토양매질의 비포화 영역을 통과하여 포화 영역으로 이동하므로 토양매질에서의 정확한 비포화흐름의 해석은 오염원 거동예측에 있어 매우 중요한 부분을 차지한다. 그렇지만 비포화대에서의 흐름은 비선형적인 특성으로 인하여 정확한 거동을 예측하기가 매우 어렵다. 비포화흐름을 해석하기 위해서는 연속방정식과 Darcy의 법칙을 기초로한 Richards식을 지배방정식으로 사용한다. Richards식을 해석하면 시간과 공간에 대한 함수량 또는 모세관압력의 변화를 구할 수 있게 된다. 실험을 통하여 직접 측정된 함수량의 시간과 공간에 대한 변화는 해석해나 수치해 등의 검증에 매우 유용하게 사용된다. 비포화도양에서 함수량변화를 측정할 경우 전통적으로 모세관압력을 측정하는 Tensiometer와 같은 장치를 이용하였다.

Tensiometer의 원리나 장치는 매우 간단하므로 물 보유함수(water retention curve)를 알고 있을 경우 함수량을 쉽게 측정할 수 있다. 그렇지만 Tensiometer는 측정장치 내의 압력이 정상상태에 도달하는 반응시간(response time)이 오래 소요되기 때문에 빠른시간에 함수량을 측정하여야 하는 경우 이 장치를 사용할 수 없다는 단점이 있다. 특히 건조한 상태의 매질에 흐름율이 가하여지는 경우 습윤전선(wetting front)의 진행이 급격하게 발생하기 때문에 반응시간이 많이 소요되는 장치를 이용해서는 정확한 실험결과를 얻기가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 급격한 함수량변화를 측정하기 위하여 TDR을 이용하는 함수량 측정방법을 소개하고자 한다.

2. TDR을 이용한 함수량측정의 원리

TDR은 크게 파형발생기(pulse generator)와 오실로스코프(oscilloscope)로 구성되어 있다. 파형발생기에서 발생된 구형(square wave) 전기신호가 전송선(transmission line, cable)을 통하여 흐르게 되는데

이 신호가 전송선을 통하여 흐르는 중 전송선의 단면이 변하면 그 지점의 임피던스(impedance)가 변하게 되어 그 구간에서 전기신호가 반향되어 오게된다. 이 때의 파형을 시간영역(time domain)으로 측정하는 장치가 TDR이다. 여기서 시간영역(time domain)이란 주기영역(frequency domain)과 대별되는 용어로서 시간영역에서는 모든 특성을 시간으로 표시한다. 즉, 전송선을 통과하는 신호의 전파속도(propagation velocity, V_p)를 알고 있으면 반향시간(travel time)을 통하여 전송선의 길이를 구할 수 있다. TDR은 이러한 원리를 이용하여 매설된 전선의 형상이상점이나 단락점을 검사하는데 사용하는 장치(cable tester)로 고안된 것이나 전기신호가 지나가는 지점의 유전율이 변하면 반향되는 파의 전파속도가 변하는 성질을 이용하면 토양의 함수량측정에 응용할 수 있다. TDR은 초기에 액체의 복잡한 전기허용율(dielectric permittivity)을 측정하는 장치로 사용되었으나(Fellner-Feldegg, 1969) 그 후 토양을 포함한 여러물질의 유전특성을 측정하는 장치로 사용되어지고 있으며 특히 최근에는 TDR을 이용한 토양의 함수량을 측정하는 연구들이 보고 되고있다(Topp 등, 1980; Topp와 Davis, 1985).

TDR을 이용하여 토양내 함수량을 측정하는 방법은 임피던스와 유전율의 변화로 설명할 수 있다. 파형발생기에서 발생된 신호는 신호가 흐르는 매질의 임피던스(impedance)가 변함에 따라 신호의 반향되는 정도가 달라지며 또한 매질의 유전율이 변함에 따라 신호의 전파속도가 달라지게 되는데 이 변화를 측정하기 위하여 토양내에 탐침(TDR probe, wave guide, transmission line)을 설치하게 된다. 탐침을 토양에 설치하면 동축선과 토양이 만나는 지점에서 전기신호의 1차반향이 발생하며 탐침을 되돌아오면서 2차반향이 발생한다. 전기신호가 탐침을 지날 때 토양의 함수량변화에 따라 유전율이 변하므로 2차반향점에서 반향되어 돌아오는 시간(travel time)이 달라지게 되는데 이 때 탐침을 통과하여 반향되는 전기신호의 반향시간을 TDR을 이용하여 측정하게 된다. TDR을 통하여 측정되는 반향파형은 그림 1에 나타난 바와 같다. 즉 함수량에 따라 달라지게 되는 전기신호의 반향시간을 이용하여 각 함수량에 따른 유전상수(dielectric permittivity constant)를 계산하게 된다. 이 때 유전상수 K_e 와 탐침의 길이 그리고 반향시간은 다음 식(1)과 같은 관계를 가지고 있다.

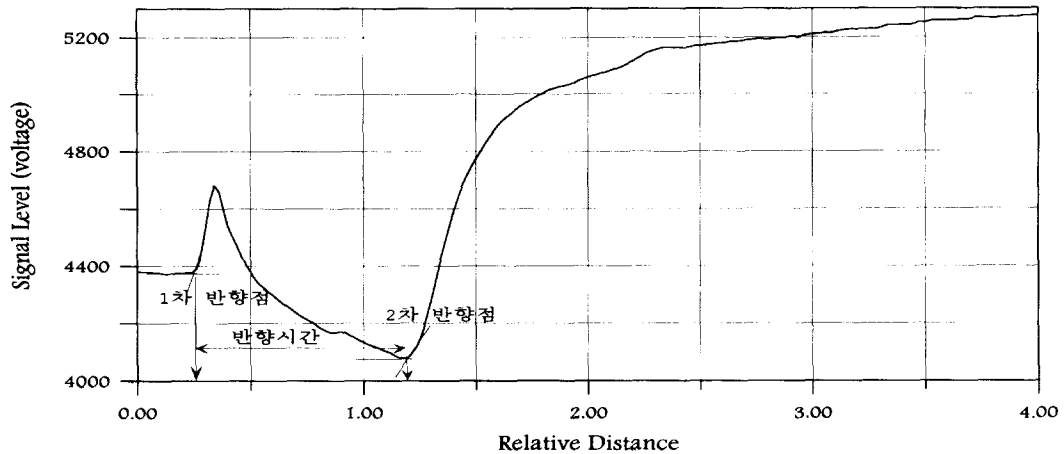


그림 1. TDR을 통하여 측정되는 반향파형

$$K_a = \left\{ \frac{c\Delta t_s}{2L} \right\}^2 \quad (1)$$

여기서 c 는 자유공간에서의 전자기신호의 전파속도(3.0×10^8 m/s)이고 Δt_s 는 TDR신호의 전달시간(sec)이며 그리고 L 은 흙속에 묻혀있는 탐침의 길이(m)를 의미한다. 토양내 함수량이 증가함에 따라 이 유전율상수도 증가하게 되는데 이를 이용하여 함수량을 추정하게 된다. 토양에 설치된 탐침을 이용하여 함수량을 측정하고자 할 경우 TDR을 통하여 얻어지는 자료는 그림 1과 같은 모양을 나타낸다. 여기에는 두 개의 반향점이 존재하는데 이 두점을 지나는 시간을 측정하여 유전율 상수를 추정하는 것이다. Topp등(1980)은 유전율상수로부터 함수량을 추정하는 식을 다음과 같이 제안하였다.

$$\theta = \frac{(-530 + 292 K_a - 5.5 K_a^2 + 0.043 K_a^3)}{10^4} \quad (2)$$

여기서 θ 는 식(1)에서 제시된 유전율상수 K_a 를 이용하여 추정된 토양내 함수량을 의미한다. 만약 동일한 토양에 대한 물보유함수곡선을 가지고 있다면 이렇게 측정된 함수량을 이용하여 각 함수량에 대한 모세관압력수두를 추정할 수 있다. Dalton(1992), Zegelin 등(1992)은 식(2)를 검토한 결과 대부분의 토양에 적용할 수 있음을 알아내었다. 하지만 Herkelrath(1991)에 의하면 유기물을 많이 함유하고 있는 토양에서는 식(2)를 사용할 수 없다고 보고하고 있다.

TDR을 이용한 함수량측정방법의 가장 큰 장점은 여러 지점의 함수량을 거의 동시에 측정할 수 있다는 점이다.

하지만 이러한 요구를 만족하기 위하여는 다중연결장치를 설치하여야 한다. TDR 본체에는 BNC형의 동축선을 연결하는 한 개의 단자가 있어 탐침을 하나밖에 사용할 수 없기 때문에 여러지점의 자료를 동시에 측정하기는 불가능하다. 다중연결장치를 이용한 자동측정장치에 관한 연구가 여러 연구자들(Heimovaara와 Bouten, 1990; Baker와 Allmaras, 1990; Herkelrath 등, 1991; Kim, 1996)에 의해 수행되어 졌는데 이들은 여러형태의 다중연결장치를 제안하였다. 본 연구에서는 전기적 신호로 제어되는 동축다중연결장치(coaxial multiplexer)를 이용하였다. 이 장치는 함수량을 측정하는 각 탐침을 순차적으로 단락시켜주어 TDR본체에서 순차적으로 함수량자료를 읽을 수 있게 해주는 기능을 담당하는 것으로 TDR본체와의 임피던스 일치(impedance matching)를 위하여 같은 임피던스를 갖는 동축선과 TDR 본체와 탐침을 순차적으로 연결시켜 주는 전기적 스위치(relay switch)로 구성되어 있다. 이 장치를 이용하면 하나의 TDR 본체에 이론적으로 총 256개의 탐침을 설치할 수 있는데 이 때 TDR을 통하여 읽혀진 반향된 전기신호자료는 본체와 컴퓨터에 설치된 통신포트를 통하여 컴퓨터에 저장하였다가 차후에 이 자료를 이용하여 함수량을 분석할 수 있다. 본 실험에서 사용한 실험기기는 다음과 같다. TDR본체는 Tektronix社의 1502B 모델이며 탐침과 동축다중연결장치는 Dynamax社의 제품이다. 함수량 계산을 위하여 사용한 프로그램은 Dynamax社에서 제공되는 TACQ와 TRAD를 사용하였다. 본 연구에서 사용한 TDR 1502B 모델에 동축다중연결장치를 연결하여 사용할 경

우 최고 256개의 함수량측정 탐침을 동시에 작동할 수 있으며 256개의 탐침 모듈을 측정하는데 약 15분이 소요된다.

3. 탐침(TDR probe)형상에 따른 반향특성

3.1 탐침의 종류

토양내 임피던스 변화를 측정하기 위해 설치되는 탐침의 기하학적 모양은 여러형태로 제안되었는데 탐침형상의 기본적인 가정은 TDR과 탐침을 연결하는 동축케

이블의 기하학적 모양을 유지시켜 주는 것이다. 탐침의 숫자에 따라 2선식(2-rod wave guide), 3선식, 4선식으로 나눌 수 있다. 2선식 탐침을 이용하여 함수량을 측정하는 경우에는 평행한 두 선의 형상이 탐침과 연결되는 동축선과 그 형상이 달라 동축선과 탐침이 만나는 경계에서 적지않은 신호의 손실이 발생하게 되는데 이 문제를 해결하기 위하여 간혹 임피던스 일치장치(impedance matching transformer, balun)를 설치하기도 한다(Herkelrath, 1991; Spaans 등,

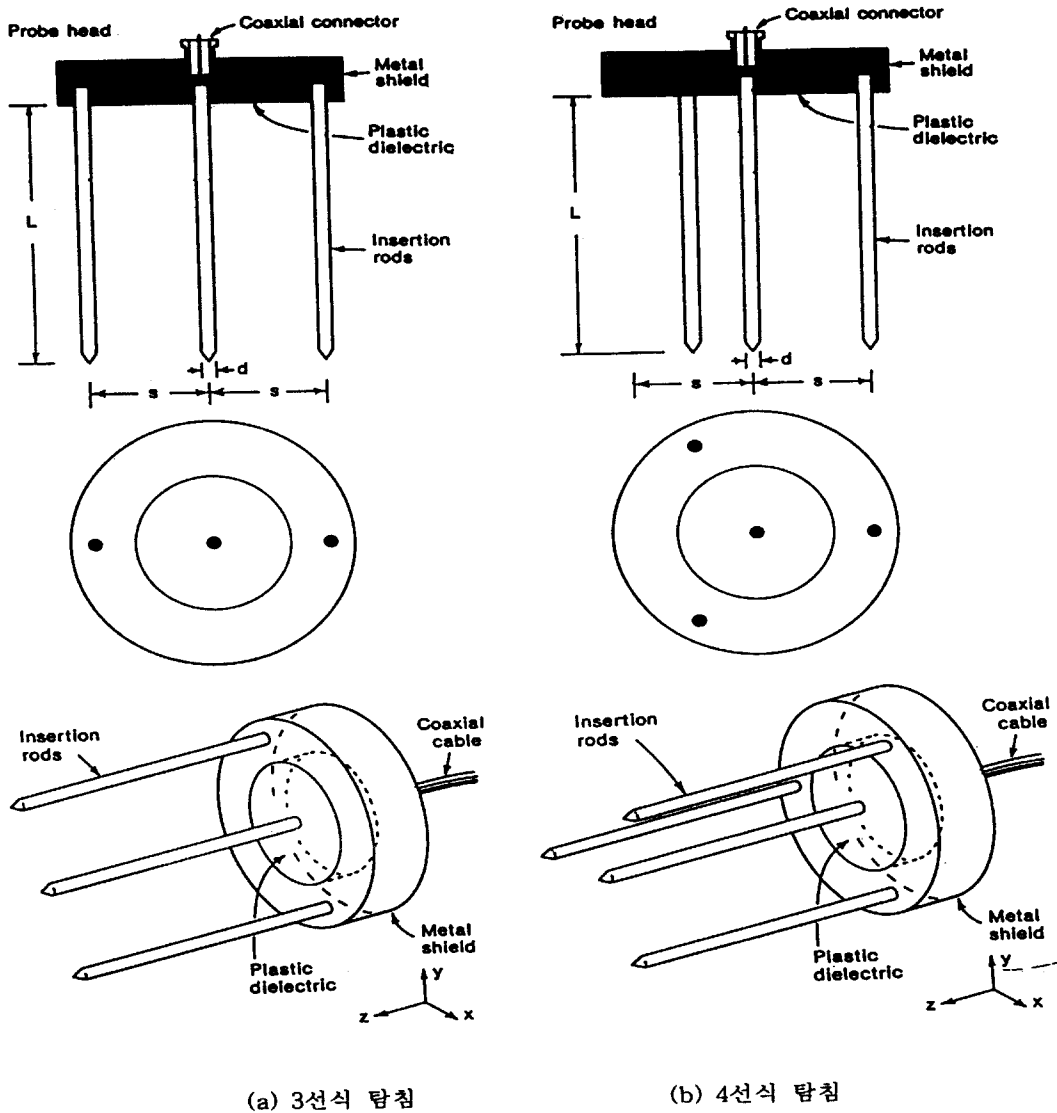


그림 2. 탐침의 종류 (Zegelin 등, 1989)

1993). 하지만 탐침이 짧을 경우($\leq 15\text{cm}$)에는 임피던스 불일치로 인한 잡음이 발생하여 신호해석시 문제가 되기도 한다. 3선식이나 4선식 탐침은 동축전송선의 기하학적인 모습을 유지하는 모습인데 임피던스 불일치로 발생하는 필요없는 잡음을 감소시켜줄 뿐 아니라 임피던스 일치장치를 필요로 하지않는다. 그림 2에서는 3선식과 4선식의 탐침 형상을 보여주고 있다(Zegelin 등, 1989). TDR의 성능은 토양에 설치되는 탐침의 길이를 결정하는데 있어 매우 중요한 역할을 한다.

TDR의 성능은 일반적으로 대역폭(Bandwidth)으로 나타내는데 여기서 대역폭이란 직류 또는 전압이 0인 값으로부터 가장 높은 진동수까지의 진동범위를 나타낸다. 대역폭(B, MHz)은 다음과 같은 (3)식으로 나타내는데, 여기서 상승시간(rising time, t_r , μsec)이란 펄스발생시 펄스가 최고값의 10%에서 90%까지 상승할 때 소요되는 시간(그림 3)으로 정의된다.

$$B = \frac{K}{t_r}, \quad K \approx 0.35 \quad (3)$$

TDR 장치로 사용되는 기기의 일반적인 대역폭은 2.5GHz에서 20GHz 정도인데 이 때의 상승시간은 140ps에서 17.5ps이다. 본 연구에서 사용한 Tektronics 1502B TDR 기기는 대역폭이 2.5GHz이다. 기기의 대역폭이 크면 상승시간이 짧은 파형을 분석할 수 있으므로 TDR의 대역폭이 크고 탐침의 길이가 길수록 많은 수의 반향신호를 측정할 수 있어 정확한 실험결과를 얻을 수 있다. 하지만 길이가 긴 탐침을 토양내 설

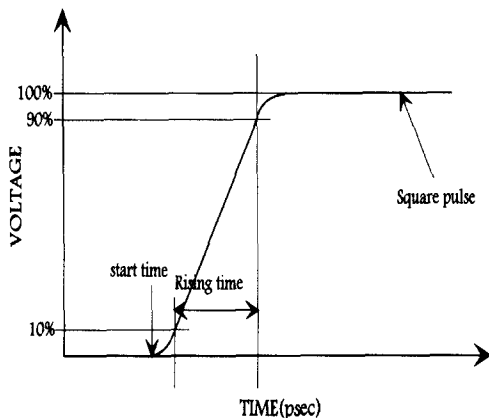


그림 3. 구형파에서의 상승시간

치할 경우 설치하는데 어려움이 있으며 측정영역이 커지는 단점이 있다. 반면 탐침의 길이가 짧아지면 작은 영역의 함수량을 측정할 수 있을 뿐 아니라 실내실험시 실험장치를 소형화할 수 있는 등의 장점이 있지만 매우 짧은 시간동안에 발생하는 반향신호를 분석할 수 있는 고가의 높은 대역폭을 가진 TDR장치를 사용하여야만 하는 단점이 있다(Kelly 등, 1995). 본실험에서 사용한 탐침은 그림 5에서와 같이 길이가 200mm인 3선식이며 각 막대의 외경은 3.2mm, 막대간격은 30mm이며 스테인레스강으로 제작되었다.

3.2 측정시 탐침에 영향을 주는 영역

탐침을 토양에 설치하여 함수량을 측정함에 있어 함수량측정에 영향을 주는 공간적 민감도는 실험장치를 설치함에 있어 매우 중요하다. Topp와 Davis(1985)는 탐침주위의 3800mm²의 타원형 단면적이 함수량측정시 영향영역이라 보고하였고, Baker 등(1989)은 1000mm²의 단면적이 가장 민감하며 3500mm²에서 4000mm²에 이르는 아령형 단면적이 그 영향권에 해당한다고 보고하고 있다. 또한 탐침을 놓아서 설치했을 경우 탐침의 각 막대 중심으로 부터 반경 2cm지역이 영향권이므로 적어도 2cm이상의 깊이로 설치해야 한다고 보고하고 있다.

4. TDR을 이용한 함수량의 검증

TDR을 이용하여 실험을 수행하기 전에 본 실험에서 사용한 TDR의 함수량측정 精度를 알아보기 위한 기기 검증을 수행하였다.

본 실험에서 사용한 토양은 성남시에 소재한 경원대학교 근처 나대지에서 채취한 토양인데 시료는 미사(silt)가 5%, 세사(fine sand)가 25%, 조사(coarse sand)가 70%로 국제토양학회나 미국농무부에 의해 제안된 토성분류법에 의하면 토성은 사토(sand)와 양질사토(loamy sand)사이해 해당한다. 실험에 사용한 토양은 5mm 크기의 체를 이용하여 자갈을 분리하고 이를 자연건조한 후 사용하였는데 체분석한 입경별 누가곡선은 그림 4와 같다. 건조부피밀도는 1.9g/cm³($\sigma^2=0.415$), 공극률은 0.27이며 포화투수계수는 $7 \times 10^{-4}\text{cm/sec}$ 이다.

4.1 검증을 위한 실험장치

TDR을 이용하여 측정한 함수량의 검증을 위하여 TDR을 이용하여 측정된 함수량과 채취한 시료를 전기 오븐에서 건조하여 측정된 함수량을 비교하였다. 이를

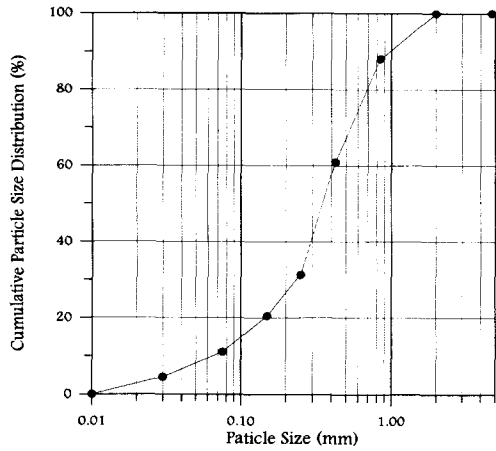


그림 4. 입경별 누가곡선(경원대 토양)

위하여 TDR 검증용 용기를 제작하였는데 이 용기는 아크릴재질로 내경 100mm, 길이 250mm인 파이프 하단에 다공성판을 부착시킨 것으로 여기에 230mm 깊이의 토양시료를 채웠다. 본 실험에서 사용한 탐침은 길이가 200mm이며 폭간거리가 60mm이므로 폭에 대해 각

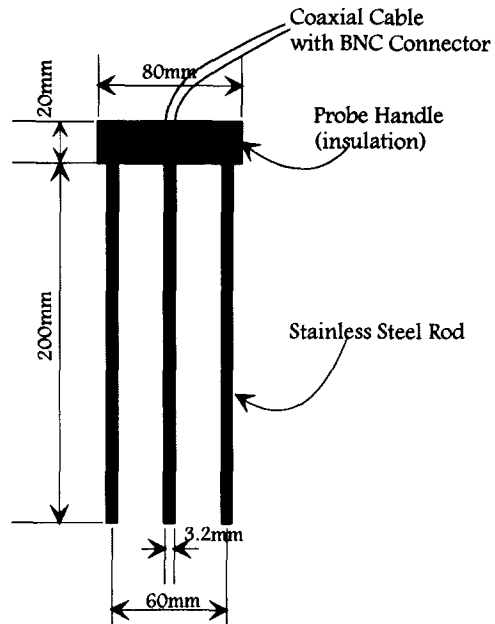
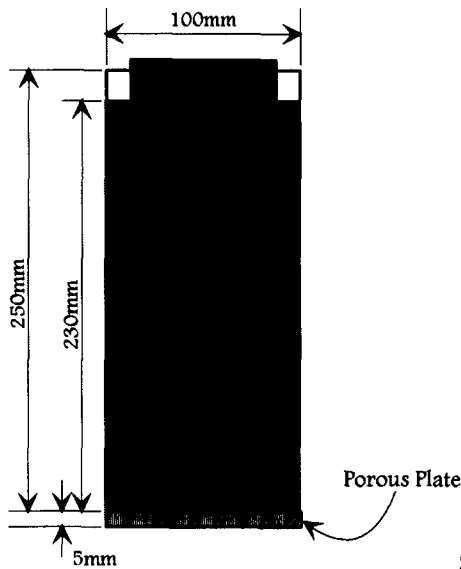
20mm, 깊이방향으로는 30mm의 여유가 있었다. 실험에서 사용한 용기는 TDR 측정시 탐침에 영향을 주는 영역에서 Baker 등(1989)이 보고한 20mm를 만족하는 영역이다. 실험에서 사용한 실험용기는 그림 5에서와 같다.

TDR 검증을 위한 실험은 다음과 같이 진행되었다. 우선 여러개의 용기에 각기 다른 함수량을 가지는 토양을 채운 후 TDR로 함수량을 측정한다. 이 후 각 토양의 시편을 채취하여 건조기에서 건조한 후 함수량을 측정하고 이 함수량과 TDR을 이용하여 측정된 함수량을 비교하였다. TDR을 이용하여 함수량을 측정하는 장치의 개략도는 그림 6과 같다. 그림에서와 같이 6개의 토양시료에 6개의 탐침을 설치하고 이들을 동축다중연결장치를 이용하여 TDR 본체에 연결한 후 통신장치를 이용하여 측정된 자료를 컴퓨터에 저장하였고 실험후 측정자료를 이용하여 함수량을 추정하였다.

4.2 검증결과

6개의 탐침을 이용하여 동시에 측정된 함수량 자료와 각 토양의 시편을 채취하여 건조기에서 건조한 후 측정된 함수량 자료를 비교하였는데 그 결과는 그림 7과 같다.

TDR Probe and Soil Column for TDR Calibration



3-Rod Wave Guide(TDR Probe)

그림 5. TDR 검증을 위하여 제작한 시료용기와 탐침

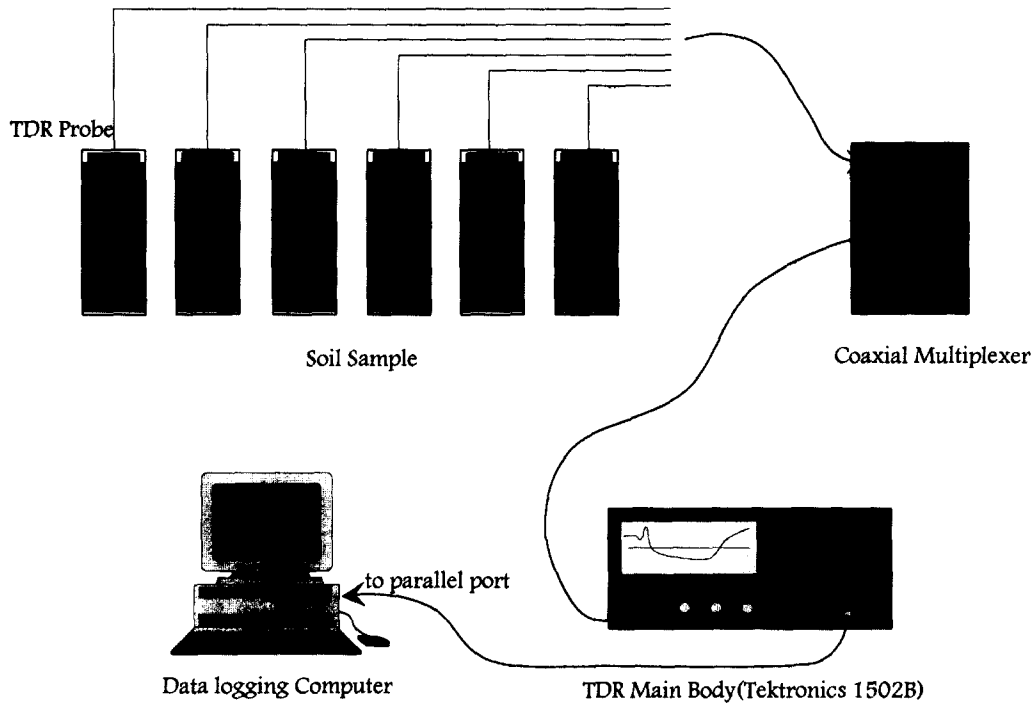


그림 6. TDR을 이용한 함수량 측정장치

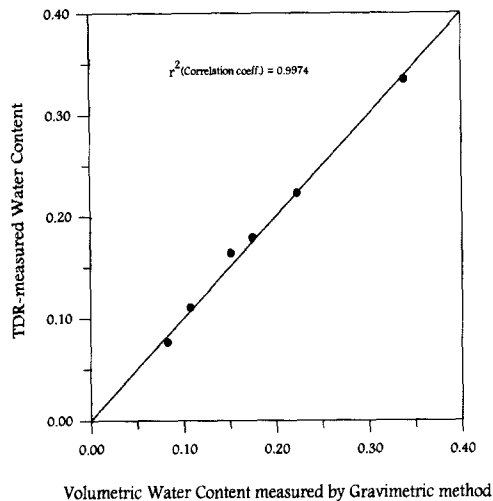


그림 7. TDR을 이용한 함수량과 실측 함수량과의 비교

TDR을 이용하여 측정된 함수량은 탐침주위 토양의 평균함수량이므로 오븐건조 함수량 측정시 시료의 평균

값을 구하여야 한다. 하지만 전체시료의 크기가 너무 크기 때문에 본 실험에서는 시료상단으로부터 7.5cm, 15cm인 2개 지점의 토양을 채취하여 함수량을 측정하였다. 또한 건조하다고 판단되는 토양시료의 경우에는 함수량분포가 고르지 않음을 감안하여 시료상단으로부터 6cm, 12cm, 18cm인 3개 지점의 토양을 채취하여 함수량을 측정하였다. 채취한 토양은 110 °C 오븐에서 2일동안 건조하여 함수량을 측정하였고(gravimetric water content ; Topp, 1993 ; Gardner, 1986), 각 시료별 지점 함수량들은 산술평균하여 그 시료의 대표값으로 사용하였다. 오븐에서 건조한 함수량을 실제 함수량이라 할 때 TDR을 사용하여 측정된 함수량의 오차율(E)은 식(4)와 같이 나타난다.

$$E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|\theta_{Ti} - \theta_{Gi}|}{\theta_{Gi}} \quad (4)$$

여기서 θ_T 는 TDR을 이용하여 측정된 함수량, θ_G 는 오븐에서 건조한 함수량, n 은 시료의 갯수를 의미한다. 이 식을 이용하여 오차율을 계산한 결과 0.034였다. 이는 각 함수량 측정시 평균 3.4%의 오차를 보일 수 있

음을 의미하는데 함수량측정의 난이도를 생각할 때 그 정도(精度)가 상당히 큼을 알 수 있다.

5. 결 론

비포화 흐름에 관한 실험은 물의 이송특성을 이해하거나 개발된 수치해를 검증할 수 있는 매우 중요한 방법이지만 Tensiometer와 같은 전통적인 측정방법은 측정시간이 길기 때문에 함수량이 급격하게 변하는 비정상 비포화흐름을 측정하는데 상당한 어려움이 있다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결할 수 있는 TDR을 이용한 함수량 측정방법에 대한 연구를 국내토양시료를 이용하여 수행하였는데 연구결과는 다음과 같다.

(1) TDR을 이용하여 측정된 함수량의 검증을 위하여 TDR을 이용하여 측정된 함수량과 채취한 시료를 전기오븐에서 건조하여 측정된 함수량을 비교하였는데 오차율이 3.4%로 측정시간이 매우 짧은 것에 비하면 비하면 매우 정확한 결과를 보이고 있다.

(2) 전통적으로 사용하는 장치를 이용할 경우 급격한 함수량변화를 측정하기가 매우 어려웠으나 TDR을 이용할 경우 빠른 시간내에 정확한 함수량의 값을 측정할 수 있다.

(3) 다중연결장치를 이용할 경우 256개 지점의 함수량을 동시에 측정할 수 있는 장점을 가지고 있어 특히 현장에서의 비포화 흐름특성을 연구하기에 아주 유리한 장치라 생각된다.

결국 TDR은 비정상류 비포화흐름의 함수량을 여러 지점에서 동시에 측정할 수 있는 매우 훌륭한 측정기로 판단된다.

참 고 문 헌

Baker, J.M. and Allmaras, R.R. (1990). "System for automating and multiflexing soil moisture measurement by TDR." *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 54, pp. 1-6.

Baker, J.M. and Lascano, R.J. (1989). "The spatial sensitivity of TDR." *Soil Science*, Vol. 147, pp. 378-384.

Dalton, F.N. (1992). "Development of time-domain reflectometry for measuring soil water content and bulk soil electrical conductivity." *Advances in measurement of soil physical properties: bringing theory into practice*, Edited by Topp, G.C. et al.,

Spec. Publ. No. 30, SSSA, Madison, WI, pp. 143-167.

Fellner-Feldegg, H. (1969). "The measurement of dielectrics in time domain." *J. Phys. Chem.*, Vol. 73, pp. 616-623.

Gardner, W.H. (1986). "Water content." *Methods of Soil Analysis*, Edited by Klute, A., Part 1, Agronomy No. 9. American Society of Agronomy, Madison, WI, pp. 493-544.

Heimovaara, T.J. and Bouten, W. (1990). "A computer-controlled 36 channel TDR system for monitoring soil water contents." *Water Resour. Res.*, Vol. 26, pp. 2311-2316.

Herkelrath, W.N., Mamburg, S.P. and Murphy, F. (1991). "Automatic, real time monitoring of soil moisture in a remote field area with TDR." *Water Resour. Res.*, Vol. 27, pp. 857-864.

Kelly, S.F., Selker, J.S. and Green, J.L. (1995). "Using short soil moisture probes with high bandwidth Time Domain Reflectometry instruments." *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 59, pp. 97-102.

Kim, D.J. (1996). "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. (1996). "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.

Spaans, E.J.A., and Baker, J.H. (1993). "Simple Baluns in parallel probes for time domain reflectory." *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 57, pp. 668-673.

Topp, G.C. (1993). "Soil water content." *Soil sampling & methods of analysis*. Edited by Carter, M.R., Canadian Society of Soil Science. Lewis Publishers. pp. 541-557.

- Topp, G.C. and Davis, J.L. (1985). "Time domain reflectometry(TDR) and its application to irrigation scheduling." *Advances in irrigation*, Edited by Hillel, D., Vol. 3, Academic, New York.
- 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, No. 574-582.
- 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.
- Zegelin, S.J., White, I. and Russell, G.F. (1992). "A critique of the time domain reflectometry technique for determining field soil water content." *Advances in measurement of soil physical properties: bringing theory into practice*. Edited by Topp, G.C. et al., Spec. Publ. No. 30, SSSA, Madison, WI, pp. 187-208.

〈최종본 도착일 : 1997년 9월 11일〉