

# TDR(Time Domain Reflectometer)을 이용한 함수량의 측정

○박재현\*, 김상준\*, 윤성용\*, 선우중호\*\*\*\*

(요지)

다공질매체에서의 포화-비포화 흐름 거동을 파악하기 위하여는 시간에 따른 함수량의 변화 과정을 정확하고 빠르게 측정하여야 한다. 본 연구는 실험실에서 함수량을 측정하는 방법의 하나로써 TDR(Time Domain Reflectometer)을 사용하는 실험 방법에 관한 연구이다.

TDR 이란 전기신호의 전도특성을 이용하여 토양내 설치된 탐침(probe)의 전기신호 반향시간을 측정하는 기기로서 이 반향시간과 토양의 유전율상수(dielectric constant)의 관계를 이용하여 함수량을 추정할 수 있다. 본 연구에서는 TDR의 원리설명과 이를 이용한 함수량측정방법을 제시하고 있다.

## 1. 서론

비포화대에서의 흐름특성, 특히 2, 3차원흐름특성에 관한 연구는 지하수오염예측을 위하여 필수불가결한 주제들이지만 비포화흐름의 비선형적인 특성으로 인하여 연구하기에 매우 어려운 분야이다. 비포화흐름을 해석하기 위해 연속방정식과 Darcy의 법칙을 기초로한 Richards 방정식을 지배방정식으로 사용하는데 이 식을 이용하여 함수량의 시간과 공간에 대한 변화를 구할 수 있다. 실험을 통하여 측정된 함수량의 시간과 공간에 대한 변화는 해석해나 수치해등의 검증에 매우 유용하게 사용되는데 비포화토양에서 함수량변화를 측정할 경우 전통적으로 tensiometer와 같은 장치를 이용하게 된다. 이 장치의 원리나 구조는 매우 간단하여 사용하기에는 용이하지만 측정장치의 압력이 정상상태에 도달하는 시간(response time)이 길기 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 발생하여 정확한 실험결과를 얻기가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 이러한 문제를 해결할 수 있는 TDR을 이용한 함수량 측정 방법을 소개하고자 한다.

## 2. TDR을 이용한 함수량측정의 원리

TDR은 크게 파형발생기(pulse generator)와 오실로스코프(oscilloscope)로 구성되어 있다. 파

\* 서울대학교 토목공학과 박사과정 수료

\*\* 경원대학교 토목공학과 부교수

\*\*\* 안산공업전문대학 토목과 전임강사

\*\*\*\* 서울대학교 총장

형발생기에서 발생한 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 오게 된다. 이 때의 파형을 시간영역(time domain)으로 측정하는 장치이다. 여기서 시간영역(time domain)이란 주기영역(frequency domain)과 대별되는 용어로서 시간영역에서는 모든 특성을 시간으로 표시한다. 즉, 전송선을 통과하는 신호의 전송속도(propagation velocity,  $V_p$ )를 알고 있으면 반향시간(travel time)을 통하여 전송선의 길이를 구할 수 있다. 처음에는 이러한 원리를 이용하여 매설된 전선의 형상이상점이나 단락점을 검사하는데 사용하는 장치(cable tester)로 고안된 것이나 반향지점의 임피던스가 변하면 반향속도도 변하는 성질을 이용하여 토양의 함수량측정에 응용한 것이다. 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 보고되고 있다(Topp 등, 1980; Topp & Davis, 1985).

파형발생기에서 발생한 신호는 신호가 흐르는 매질의 임피던스(impedance)가 변함에 따라 신호의 반향되는 정도가 달라지는 특성을 가지고 있다. 함수량이 변하면 토양내의 임피던스가 변하게 되는데 이 변화를 측정하기 위하여 토양내에 탐침을 설치하게 된다. 이 탐침을 통과하여 반향되는 전기신호의 반향시간을 TDR을 이용하여 측정하는데 이 시간은 전기신호가 흐르는 도체의 전도도에 따라 달라지게 된다. 원래 토양은 토양내 수분에 의하여 전기전도율이 존재하며 이 전기전도율은 토양내에 함수량이 변화함에 따라 변한다. 이는 함수량에 따라 전기신호의 반향시간이 달라지게 됨을 의미한다. 이 전기신호 반향시간을 이용하여 각 함수량에 따른 유전율상수(dielectric permittivity constant)를 계산하게 된다. 유전율상수  $K_a$ 와 탐침의 길이 그리고 반향시간은 다음과 같은 관계를 가지고 있다.

$$K_a = \left\{ \frac{c \Delta t_s}{2L} \right\}^2$$

여기서  $c$ 는 자유공간에서의 전자기신호의 전파속도( $3.0 \times 10^8 m/s$ )를  $\Delta t_s$ 는 TDR신호의 전달시간을  $L$ 은 흙속에 묻혀있는 탐침의 길이를 의미한다. 토양내 함수량이 증가함에 따라 이 유전율상수도 증가하게 되는데 이를 이용하여 함수량을 추정하게 된다. 토양에 설치된 탐침을 이용하여 함수량을 측정하고자 할 경우 TDR을 통하여 획득하는 자료는 그림 1과 같은 모양의 그래프이다. 여기에는 두 개의 반향점이 존재하는데 이 두점을 지나는 시간을 측정하여 유전율 상수를 추정하는 것이다. Topp등(1980)은 유전율상수로부터 함수량을 추정하는 아래와 같은 식을 제안하였다.

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

여기서  $\theta$ 는 유전율상수  $K_a$ 를 이용하여 계산된 토양내 함수량을 의미한다. 만약 동일한 토양에 대한 물보유함수곡선을 가지고 있다면 이렇게 측정된 함수량을 이용하여 각 함수량에 대한 모세관압력수두를 추정할 수 있다. TDR을 이용한 함수량측정방법의 가장 큰 장점은 여러지점의 함수량을 짧은시간내에 측정할 수 있다는 점이다. 하지만 이러한 요구를 만족하기 위하여는 다중연결장치를 설치하여야 한다. TDR본체에는 BNC형의 동축선을 연결하는 한 개의 단자가 있어 탐침

을 하나밖에 사용할 수 없기 때문에 여러지점의 자료를 동시에 측정하기는 불가능하다. 다중연결 장치를 이용한 자동측정장치에 관한 연구가 여러 연구자들에 의해 수행되어졌는데(Heimovaara & Bouten, 1990; Baker & Allmaras, 1990; Hinkelrath 등, 1991) 연구자들이 제안한 장치는 동축다중연결장치(coaxial multiplexer)이다. 이 장치는 TDR본체와의 임피던스일치를 위하여 같은 임피던스를 갖는 동축선을 가지며 전기적 스위치(relay switch)를 이용하여 TDR 본체와 탐침을 순차적으로 연결시켜주는 장치이다. 이 장치를 이용하면 이론적으로 총 256개의 탐침을 설치할 수 있다. 여기서 동축다중연결장치는 함수량을 측정하는 각 탐침을 순차적으로 단락시켜주어 TDR본체에서 순차적으로 함수량자료를 읽을 수 있게 해주는 기능을 담당하는 장치이다. 이 때 읽혀진 자료는 본체와 컴퓨터에 설치된 통신포트를 통하여 컴퓨터에 저장되며 이 자료들은 차후에 함수량으로 분석할 수 있다.

본 실험에서 사용한 TDR본체는 Tektronix사의 1502B 모델이며 탐침과 동축다중연결장치(coaxial multiplexer)는 Dynamax사의 제품이다. 함수량 계산을 위하여 사용한 프로그램은 Dynamax사에서 제공되는 TACQ와 TRAD를 사용하였다. 본 연구에서 사용한 TDR 1502B 모델에 동축다중연결장치를 연결하여 사용할 경우 최고 256개의 함수량측정 탐침을 동시에 작동할 수 있으며 256개의 탐침 모두를 측정하는데 약 15분이 소요된다.

### 3. 탐침(wave guide)형상에 따른 반향특성

#### 3.1 탐침의 종류

토양내 임피던스변화를 측정하기 위해 설치되는 탐침의 기하학적 모양은 여러 연구자들에 의하여 제안되었는데 탐침형상의 기본적인 가정은 TDR과 탐침을 연결하는 동축케이블의 기하학적 모양을 유지시켜 주는 것이다. 탐침의 숫자에 따라 2선식(2-rod wave guide), 3선식, 4선식으로 나눌 수 있다. 본 실험에서 사용한 탐침은 길이가 200 mm인 3선식이며 각 막대의 외경은 0.32 mm, 막대간격은 30 mm이며 스테인레스강으로 제작되었다. 2선식 탐침을 이용할 경우에는 임피던스 일치장치(impedance matching transformer, balun)를 설치하여야 하나 3선식 탐침을 사용할 경우에는 이 장치가 필요없다. 탐침의 길이는 TDR의 성능에 좌우되는데 길이가 짧아지면 실험을 하는데 있어 여러 가지의 장점이 있지만 고해상도를 가진 오실로스코프를 이용하여야만 하는 단점을 가지고 있다.

#### 3.2 측정시 탐침에 영향을 주는 영역

탐침을 토양에 설치하여 함수량을 측정함에 있어 함수량측정에 영향을 받는 공간적 민감도는 실험장치를 설치함에 있어 매우 중요하다. Topp & Davis(1985)는 탐침주위의 3800 mm<sup>2</sup>의 타원형 단면적이 함수량측정시 영향영역이라 보고하였고, Baker 등(1989)은 1000 mm<sup>2</sup>의 단면적이 가장 민감하며 3500 mm<sup>2</sup>에서 4000 mm<sup>2</sup>에 이르는 아령형 단면적이 그 영향권에 해당한다고 보고하고 있다. 또한 탐침을 넓혀서 설치했을 경우 탐침으로부터 반경 2 cm 지역이 영향권이므로 적어도 2 cm 이상의 깊이로 설치해야 한다고 보고하고 있다.

#### 4. TDR을 이용한 함수량의 측정

본 연구에서는 TDR을 이용하여 1차원침투에 관한 실험을 수행하였다. 이에 앞서 본 실험에서 사용한 TDR의 함수량측정 정도를 알아보기 위한 기기검증을 수행하였다.

##### 4.1 TDR의 검증(calibration)

TDR의 검증을 위하여 TDR 검증용 용기를 제작하였다. 용기는 아크릴제질로 내경 100 mm, 길이 250 mm인 파이프 하단에 다공성판을 부착시켰다. TDR 검증실험은 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 측정한 함수량을 비교하였다.

##### 4.2 1차원 비포화흐름에의 적용

건조토양에서 발생하는 급격한 침투현상시 함수량의 변화를 TDR을 이용하여 측정하는 실험을 준비하였다. 실험을 위하여 1차원실험용 용기를 제작하였다. 용기는 내경 250 mm, 길이 600 mm, 두께가 10 mm인 아크릴 파이프로 제작하였는데 하단부는 두랄루민으로 제작된 다공성판이 설치되어 배수를 용이하게 하였다. 파이프 정면에는 TDR을 용이하게 설치할 수 있도록 평면판을 부착하였고 그 곳에 TDR 설치용 JIG(probe placement hole)를 설치하였다. 침투현상을 모형화하기 위하여 토양의 표면에 흐름률을 공급하였다. 흐름률은 미량펌프를 이용하였으며 공급한 흐름률은 시료의 포화투수계수에 해당하는  $7 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$ 이다.

#### 5. 결론

본 연구에서는 건조토양에서 발생하는 급격한 침투현상시 함수량의 변화를 TDR을 이용하여 측정하는 실험을 수행하였다. 전통적으로 사용하는 장치를 이용할 경우 급격한 함수량변화를 측정하기가 매우 어려우나 TDR을 이용할 경우 정확한 함수량의 값을 측정할 수 있었다. 다중연결 장치를 이용할 경우 256개 지점의 함수량을 동시에 측정할 수 있는 장점을 가지고 있어 특히 현장에서 비포화흐름특성을 연구하기에 아주 유리한 장치라 생각된다.

## 참고문헌

- Baker, J.M. and R.R. Allmaras (1990). System for automating and multiflexing soil moisture measurement by TDR, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54, 1-6.
- Baker, J.M. and R.J. Lascano (1989). The spatial sensitivity of TDR, *Soil Science*, 147, 378-384.
- Fellner-Feldegg, H. (1969). The measurement of dielectrics in time domain, *J. Phys. Chem.*, 73, 616-623.
- Heimovaara, T.J. and W. Bouten (1990). A computer-controlled 36 channel TDR system for monitoring soil water contents, *Water Resour. Res.*, 26, 2311-2316.
- Herkelrath, W.N., S.P. Mamburg, and F. Murphy(1991). Automatic, real time monitoring of soil moisture in a remote field area with TDR, *Water Resour. Res.*, 27, 857-864.
- Topp, G.C., and J.L. Davis(1985). Time domain reflectometry(TDR) and its application to irrigation scheduling. In *Advances in irrigation*, vol. 3, Daniel Hillel(ed.), Academic, New York.
- Topp, G.C., J.L. Davis, and A.P. Annan (1980). Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines, *Water Resour. Res.*, 16, 574-582.