

지하댐 지반 물성치 측정을 위한 유전율 측정 시스템 개발

김만일^{*1)}, 정교철²⁾, 박창근³⁾

¹⁾한국수자원공사 수자원연구원, ²⁾안동대학교 지구환경과학과, ³⁾관동대학교 토목공학과

A Development of Dielectric Measurement System for Detecting Physical Parameters of Ground in Subsurface Dam

Man-il Kim^{*1)} · Gyo-Cheol Jeong²⁾ · Chang-Kun Park³⁾

¹⁾Korea Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation

²⁾Dept. of Earth and Environmental Sciences, Andong National University

³⁾Dept. of Civil Engineering, Kwandong University

매질이 가지는 고유의 유전율 특성을 이용하여 체적함수비를 실시간으로 측정할 수 있는 유전율 측정장비인 Frequency Domain Reflectometry (FDR) system 및 측정센서를 제안하였다. 특히 측정센서의 형태는 7cm, 10cm, 15cm 길이로 각기 제작하여 유전율상수의 특성을 파악하였다. 본 장비의 유전율측정은 0.1~1.7GHz의 고주파수 범위 내에서 발생된 전자파를 방향성결합기를 통과하여 매질에 설치된 측정센서에서 입사파와 반사파의 간섭현상을 이용함으로써 측정이 가능하다. 본 실내시험 연구에서 획득된 연구결과는 유전율상수의 변화로부터 체적함수비를 지속적으로 측정할 수 있는 점에서 비파괴 모니터링 기술로 구분할 수 있다. 체적함수비와 유전율상수의 관계에서 측정센서의 로드길이에 따른 측정오차는 다소 파악되나, 이들의 관계로부터 Topp et al.(1980) 교정곡선과 비교하여 표준사에 대한 1차원 관계식과 관계곡선을 유도할 수 있었다. 결론적으로 제안된 FDR system과 측정센서로부터 측정된 측정결과들은 Topp et al.(1980) 교정곡선과 매우 흡사한 형태를 보여준다.

주요어 : Frequency Domain Reflectometry, 측정센서, 유전율상수, 체적함수비

The authors designed a new technique to measure dielectric constant of a soil media by Frequency Domain Reflectometry (FDR) system and its measurement sensor probe with different length such as 7cm, 10cm and 15cm for estimating the variations of dielectric constant.

Measurement of dielectric constant of soil material is possible to measure an interference wave generated by between incidence wave and reflection wave which are detected to electro-magnetic wave through the directional coupler at the high frequency range, 0.1 to 1.7GHz, by FDR system. The obtained experimental results verified that the technique is very promising for non-destructive and continuous soil volumetric water content measurement monitoring in a laboratory. The relationship between the soil volumetric water content and the dielectric constant of soil media (standard sand) was expressed by a single regression curve independent of soil texture at a small experimental error. Also the derived regression curve coincided well with that obtained by Topp curve.

Key words : Frequency Domain Reflectometry, Measurement sensor probe, Dielectric constant, Volumetric water content

* Corresponding author: mikim916@hotmail.com

서 언

지하땀은 지하 차수벽 상류부의 충전층 및 풍화층의 공극을 이용하여 지하수를 확보하는 땀으로 충전/풍화 지반의 체적함수비, 유효공극률 등 지반의 고유 특성을 파악하는 것이 매우 중요하다고 하겠다.

이러한 지반은 매우 복잡한 물질로 구성되어 있으며, 외부의 여러 가지 요인들에 의해 지반매질의 물리적 특성들이 변화한다. 그렇지만 지반매질은 고체, 기체, 액체의 기본적인 세 가지 형태로 이루어져 있어서 서로 다른 물리적 특성을 가지고 있을 뿐만 아니라 물리적 성질의 변화도 매우 복잡하다.

이 연구에서 제안하는 유전율방법은 이러한 세 가지 형태의 물질들에 대한 유전율상수 변화로부터 지반매질의 물리적 특성을 효율적으로 측정할 수 있는 유전율 측정장비인 Frequency Domain Reflectometry (FDR) system 및 그 측정센서에 대한 연구를 수행하였다.

이미 잘 알려진 대표적인 유전율 방법인 Time Domain Reflectometry(TDR) 기술은 수십 년간 관련 연구자들에 의해서 연구되어 왔다(Jackson, 2003; Huisman et al., 2001; Chan and Knight, 1999; Herkelrath et al., 1992). 이 TDR 측정센서는 2선식 내지 3선식의 로드형태로 제작되어 이것을 측정대상 매질에 설치하여 측정센서 주변의 유전율상수 변화로부터 체적함수비 등을 측정하는 방법이다. 이러한 연구는 실내 및 야외에서 다공질매체에 대한 체적함수비 내지 밀도의 관계를 유전율상수로부터 유도할 수 있는 것으로 알려져 있다. 또한 이것은 지반의 오염평가에도 적용되어져 왔다(Drnevich et al., 2001; Jones and Or, 2001).

하지만 TDR 측정센서는 앞서 설명한 바와 같이 2선, 3선식 로드형태이므로 대상매질에 직접 설치하기가 다소 어려움이 있을 뿐만 아니라 설치과정 중 이로드의 휨 정도에 따라 유전율상수 측정치에 영향을 미친다. 이러한 측정센서의 측정오차 및 운영상의 편의를 도모하기 위한 새로운 측정센서의 개발이 절실히 요구된다. 이에 본 연구에서는 고주파수인 0.1~1.7GHz 범위 내에서 발생된 전자파를 이용하여 유전율상수를 측정할 수 있는 측정 장비와 측정센서를 연구 개발하여 효율적인 지반매질의 물성치를 파악할 수 있도록 고려했다. 특히, 측정 주파수 범위가 저주파수에서 고주파수로 높아질수록 측정센서 주변에서 유전율상수 측정이 보다 정밀하게 이루어진다. 이에 0.1GHz 정

도를 사용하는 TDR보다는 높은 주파수의 전자파를 사용하는 본 장비의 적용성이 더욱 더 측정상의 효율성을 증대시킬 수 있을 것으로 판단된다. 특히, 측정센서가 1선식으로 이루어져 있기 때문에 실내 및 야외에서 측정센서의 설치가 용이할 뿐 아니라 다양한 방법으로 실시간 유전율상수의 측정이 충분히 가능할 것으로 생각된다. 그리고 이러한 유전율방법의 적용 분야 및 획득된 측정 결과로부터 지반환경의 공학적 측면에서 다양한 매체에 대한 정량적인 물리적 특성을 검토할 수 있다.

이에 새로이 소개되는 본 측정시스템에 대한 측정원리 및 장비 설명과 더불어 시험 적용성을 평가하기 위한 기초적 연구로서 이 연구를 수행하였다.

Frequency Domain Reflectometry(FDR) 시스템

FDR 측정원리

다공질매질 내에서 전자파의 전달속도는 그 매질의 유전율상수(dielectric constant, ϵ) 및 식 (1)과 밀접한 관계를 가지고 있다.

$$C = \frac{C_0}{\sqrt{\epsilon}} \quad (1)$$

여기서 ϵ 은 다공질 매질의 유전율상수, C 는 유전율상수 ϵ 의 매질 내에서 전자파의 전달속도, C_0 는 광속도 (3×10^8 m/s)이다.

자연 함수상태 하에서 흙 입자를 구성하고 있는 광물입자에 대한 유전율상수는 약 5~9 정도이지만, 건조된 흙의 경우는 고상율을 고려한다면 약 2.5~4 정도의 유전율상수를 보인다. 일반적인 물의 유전율상수는 물분자의 결합구조에 의해 쌍극자 모멘트를 나타내기 때문에 다른 매질의 유전율상수와 비교해 매우 큰 약 80~81 정도 (20 °C)를 나타낸다. 그러므로 흙 입자와 물의 유전율상수의 범위를 고려해본다면 흙의 유전율상수는 이들이 물을 함유하고 있는 체적함수비에 의해 크게 좌우된다고 볼 수 있다. 이는 Topp et al.(1980) 및 Ansolte et al.(1985)에 따르면 측정되는 흙의 유전율상수는 이들을 구성하고 있는 흙 입자들의 상호 유전

을 반응에 의한 것이 아니라 흙 입자 사이에 존재하는 공극 내에 함유된 물, 즉 체적함수비 (volumetric water content, θ)에 의해 결정된다. 따라서 유전율상수와 체적함수비의 교정곡선을 작성한다면, 유전율상수를 측정해 간단하게 대상 매질의 체적함수비를 얻을 수 있다.

측정시스템의 구성은 발신기(tracking generator)로부터 발생된 고주파수 범위 (0.1~1.7GHz)의 전자파를 방향성결합기(directional coupler)를 통하여 측정센서가 삽입 설치된 흙 시료로 전달된다. 시료에서의 입력단과 측정센서의 끝부분까지의 반사파는 방향성결합기를 경유해 스펙트럼분석기(Spectrum Analyzer)에서 측정 주파수 영역에서의 측정된 주파수 곡선을 보여준다. 이와 같이 측정된 주파수 곡선을 대상으로 데이터로거(laptop computer)를 이용해 대상매질의 유전율상수를 측정하게 된다 (Fig. 1).

흙 시료 내부로 전달되는 입사파의 속도는 측정센서가 설치된 주위의 유전율에 의해 결정되기 때문에 측정센서의 전체 로드부분에서 전달된 전자파인 입사파와 반사파의 위상의 차이, 즉 동축케이블과 연결된 방향성결합기와 측정센서에서 반사파의 전달속도가 서로 다른 시간 범위 내에서 전달되기 때문에 동축케이블 내에서 합성간섭파가 발생된다. 이 때 측정센서 입력단에서의 반사파와 흙 시료 내에 삽입 설치되어진 측정센서 로드(길이 L) 끝부분에서의 반사파와의 지연시간 t 는 흙 시료 내에서 전자파의 전달속도(C)를 이용해서 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$t = \frac{2L}{C} \quad (2)$$

여기서, 신호의 각 주파수를 ω 로 하여 동축케이블과 측정센서 로드의 결합부분의 반사파를 $A \cdot \exp(j\omega\tau)$ 로 한다면, 측정센서 로드 끝부분까지의 반사파이다. 하지만 동축케이블을 통과하는 신호성분은 신호가 측정센서 로드부분만을 왕복하는데 필요로 하는 시간 t 만큼만 위상이 변화하기 때문에 $B \cdot \exp(j\omega(\tau - t))$ 가 된다. 그러므로 두 개의 반사파 관계는 다음 식과 같이 합성과 Φ 로 나타낼 수 있다.

$$\Phi = A \cdot \exp(j\omega\tau) + B \cdot \exp(j\omega(\tau - t)) \quad (3)$$

측정된 전압은 합성과 Φ 의 절대값으로 비교한다면, Φ 를 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} |\Phi| &= A \cdot \left[1 + \left(\frac{B}{A}\right)^2 + 2 \cdot \left(\frac{B}{A}\right) \cdot R_e\{\exp(-j\omega t)\} \right]^{\frac{1}{2}} \\ &= A \cdot \left[1 + \left(\frac{B}{A}\right)^2 + 2 \cdot \left(\frac{B}{A}\right) \cdot \cos(-j\omega t) \right]^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, 신호의 각주파수를 주파수 f 로 표현한다면 아래와 같다.

$$\omega = 2\pi f \quad (5)$$

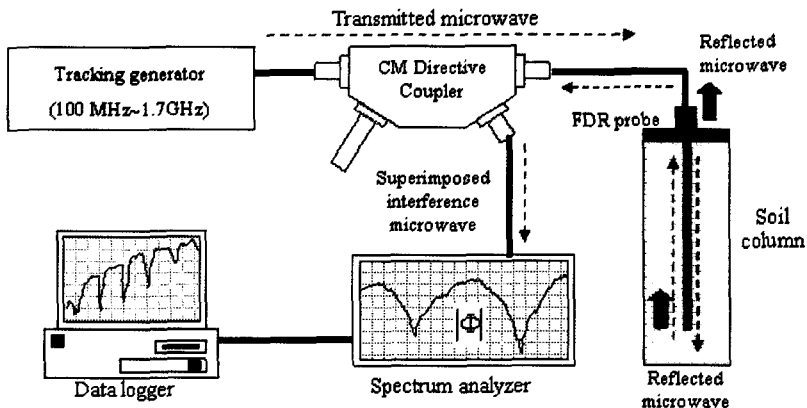


Fig. 1. Schematic diagram of Frequency Domain Reflectometry system.

동축케이블 내에서 반사파의 전압 진폭은 Φ 를 의미하기 때문에 식 (4)로부터 인지할 수 있다. 또한 두 개의 반사파에 대한 간섭의 결과에서 반사파의 스펙트럼 $\Phi(w)$ 는 일정한 주파수 간격을 요철(凹凸)로 표현된다. 분석된 주파수 형태상의 꺾과 꺾, 그리고 꺾과 꺾 부분에서의 주파수차를 Δf 로 하여 다음의 관계가 성립된다.

$$2\pi\Delta ft = 2\pi \tag{6}$$

이며, 이를 다시 정리하면

$$t = \frac{1}{\Delta f} \tag{7}$$

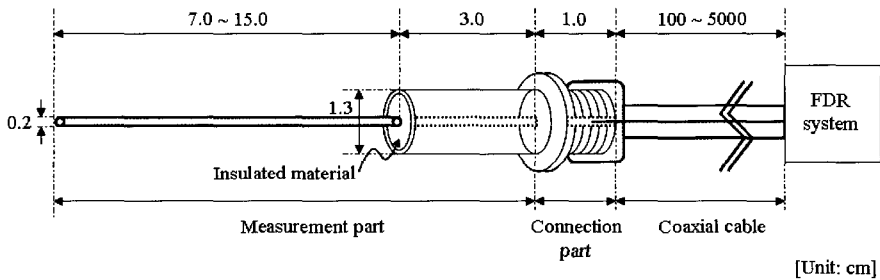
가 된다. 식 (2)를 대입하여 계산하면

$$\Delta f = \frac{C}{2L} \tag{8}$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 식 (1)을 대입하여 식 (9)로부터 유전율상수 ϵ 을 구할 수 있다.

$$\epsilon = \left(\frac{C_0}{2L \cdot \Delta f} \right)^2 \tag{9}$$

식 (9)를 이용하여 간섭파의 주파수 간격으로부터 매질의 유전율상수를 계산할 수 있다.



(a) Schematic diagram of measurement sensor probe



(b) Manufactured measurement sensor probe

Fig. 2. Schematic diagram of one-line type measurement sensor probe for connecting Frequency Domain Reflectometry system.

1선식 측정센서

FDR 측정장비를 이용해 매질의 유전율상수 측정은 1선식 측정센서를 제작하여 사용하였다. 앞서 설명한 것과 같이 FDR의 방향성결합기로부터 선별적으로 입사파와 반사파의 전송을 동축케이블을 통하여 전달되기 때문에 측정센서도 입사파에 의한 매질 내에서 반사파의 원활한 전달을 위하여 입사파의 간섭을 최소화하기 위해 절연물질을 사용하여 제작하였다(Fig. 2).

제작된 측정센서의 측정부는 전자파를 원활하게 전달시키기 위하여 구리(copper) 금속물질을 사용하였다. 특히 측정부로 전달된 전자파의 간섭을 최소화하기 위해 측정 로드부분과 결합되는 부분은 절연물질을 사용해 완전히 밀봉하였다. 이렇게 제작된 측정센서는 FDR 장비의 방향성결합기와 연결된 동축케이블(coaxial cable)에 연결하게 된다. 따라서 이 측정센서를 측정대상 매질에 삽입 설치하여 실질적으로 대상 매질의 유전율상수를 측정할 수 있는 측정센서 부분은 동축케이블과 연결된 부분을 제외한 직경 0.2cm의 로드부분에서만 가능하다.

이 연구에서는 측정센서의 측정부분인 1선식 로드의 길이를 7cm, 10cm, 15cm로 각기 제작하여 동일한 시험 조건하에서 적용하여 측정센서의 로드 길이에 따른 유전율상수의 변화를 검토하기 위해서이다. 또한, 다양한 시험조건에 따라 효과적인 측정센서의 설치 및 운영에 따른 유전율상수의 정밀도를 파악하기

위함이다.

FDR 장비구성

Fig. 3은 각 장비를 조립하여 완성된 FDR 측정장비 및 이와 연결된 측정센서의 연결 상태를 보여주는 개략도이다. 실제 설치된 FDR 장비 내에는 방향성결합기가 포함되어져 있어 현장시험 등을 위해 휴대 이동성이 우수하다. 특히, 한 대의 FDR 장비에 연결할 수 있는 측정센서는 총 20개 채널을 이용하여 동시에 서로 다른 위치에 설치되어 있는 측정센서로부터 각각의 유전율상수를 측정할 수 있는 장점도 함께 가지고 있다. 제작된 FDR 장비의 크기는 가로 57cm, 세로 45cm, 폭 40cm 정도이며, FDR 장비의 조작 및 측정자료 저장을 위한 데이터로거가 함께 부착되어 있다. 이러한 FDR 장비의 운영은 데이터로거에서 측정방법의 설정이 가능할 뿐만 아니라 측정된 자료를 실시간으로 확인할 수 있어 효율적인 관리도 함께 수행될 수 있다.

시험 및 결과

제작된 FDR 장비 및 측정센서를 사용하여 매질의 유전율상수 측정정도를 파악하기 위해 실내칼럼시험을 실시하였다. 이 시험을 위하여 별도 제작된 아크릴

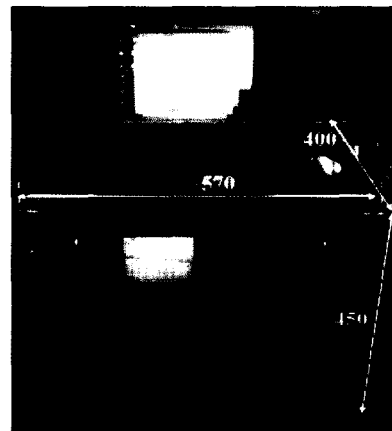
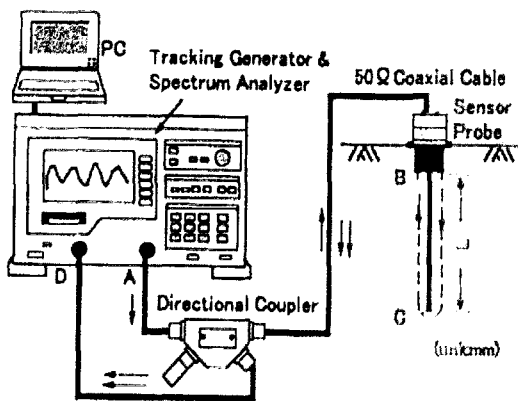


Fig. 3. Setup of Frequency Domain Reflectometry system.

칼럼의 크기는 직경 5cm, 높이 20cm이며, 3종류의 로드길이가 서로 다른 측정센서를 사용하여 매질의 유전율상수를 측정할 수 있도록 고안하였다. 이 칼럼 내로 측정센서 설치시 칼럼 상단부 뚜껑을 아크릴로 제작하여 칼럼의 중앙부로 측정센서의 설치가 용이하도록 하였다.

이 시험에 사용된 흙 시료는 표준사(standard sand)를 사용하여 동일한 공극률(porosity, $n=0.40$) 상태에서 체적함수비만을 단계적으로 변화시켜 유전율 시험을 수행하였다. Fig. 4와 Table 1은 표준사에 대한 입도 분석 결과를 보여준다(Head, 1980). 수행된 시험은 유전율상수와 체적함수비의 관계인 교정곡선을 확인하기 위함이며, 측정된 시험결과를 Topp et al.(1980) 교정곡선과 비교함으로써 FDR 장비 및 각 측정센서의 적합성 검토를 수행하였다.

유전율 교정곡선(체적함수비-유전율상수)

초기공극률(initial porosity)은 일정하지만 각기 다른 체적함수비 범위 내에서 제작된 흙 칼럼을 대상으로 유전율상수를 측정하였다. 흙 칼럼 내 흙의 상태는 불포화상태(체적함수비: 0.0~0.39cc) 및 포화상태(체적함수비: 0.40cc)로서 유전율 측정시험 종료 후, 24시간 건조시험(dry oven test)을 실시하여 정량적인 체적함수비 및 공극률을 다시 측정하였다.

Fig. 5는 각기 다른 측정센서 길이(7cm, 10cm, 15cm)에 따른 체적함수비와 유전율상수의 변화를 도시한 것이다. 동일한 흙 시료 조건하에서 실시된 시험에서는 각기 다른 측정센서의 길이에 따라 유전율상수의 측정치가 체적함수비 0.25cc를 기준으로 양분된 결과를 보여준다. 이는 Topp et al.(1980) 교정곡선과 비교해보면 체적함수비가 작을 경우, 3종류의 측정센서의 결과와 거의 동일한 결과 치를 보였으나, 체적함

Table 1. Sieve analysis result of standard sand.

Sand	Distributions of particle size (%)				Specific gravity (g/cm ³)	Uniformity coefficient (U)
	Gravel (60~2mm)	Sand (2~0.06mm)	Silt (0.06~0.002mm)	Clay (>0.002mm)		
Standard sand	0.00	99.90	0.10	0.00	2.65	1.607

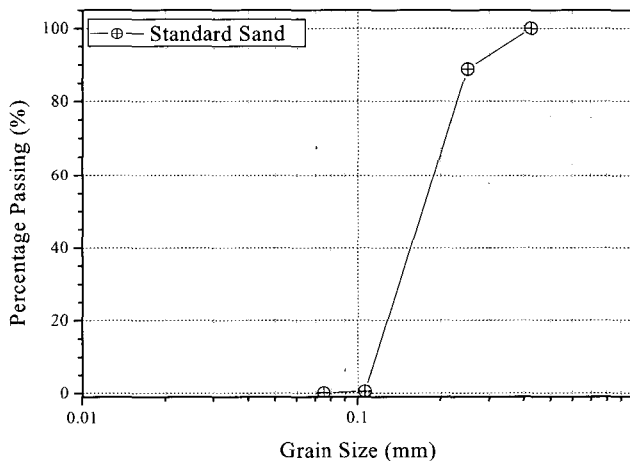


Fig. 4. Particle size curve - standard sand.

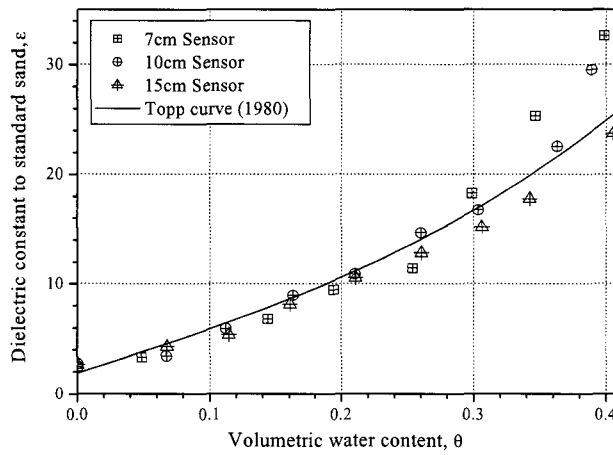


Fig. 5. Volumetric water content verse dielectric constant with different length of measurement sensor.

수비가 증가할수록 각 측정센서에서의 측정치가 다소 분산되는 것을 확인하였다.

이러한 현상은 측정센서의 길이가 짧아질수록 유전율상수 측정치는 다소 감소함으로써 입사파가 다공질 매질 내로 방출된 후 측정센서 주변에서 반사되어 되돌아온 반사파의 주시시간의 차이에 의한 것으로서 판단된다. 또한, 다량의 체적함수비를 가진 흙 시료에 대해 이와 접촉하고 있는 각 측정센서의 측정로드 부분의 접촉면이 넓어질수록 유전율상수의 측정치는 높아진다. 이는 흙 입자와 물의 유전율상수와 비교해 알 수 있듯이, 다량의 함수비를 가진 흙 시료에 대한 유전율상수는 체적함수비의 부피에 영향을 가장 크게 받기 때문이다.

토 의

동일한 공극률($n=0.40$) 조건하에서 체적함수비가 서로 다른 각 흙 칼럼에 대한 유전을 측정시험은 흙의 공극 내 물을 함유하고 있는 정도에 따라 유전율상수의 변화를 충분히 파악할 수 있었다. 이는 Time Domain Reflectometry (TDR) 측정법을 사용하여 각 흙 시료에 대한 체적함수비와 유전율상수의 변화를

측정한 결과와 매우 유사하게 나타났다. 이와 같이 흙 시료의 유전율상수 변화는 건조된 흙보다는 포화된 흙에서 측정된 유전율상수가 급격히 상승함을 보인다. 이것은 이미 알려진 매질의 유전율상수 값으로부터 알 수 있듯이, 물과 흙 입자에 대한 유전율상수가 매우 큰 차이를 보이기 때문이다(Noborio, 2001; Jacobsen and Schjønning, 1993).

그리고 제작된 7cm, 10cm, 15cm의 측정로드 길이를 갖는 측정센서에서 체적함수비 변화에 따른 유전율상수의 측정치는 체적함수비 약 0.0~0.25cc 정도의 범위까지는 Topp et al.(1980) 교정곡선과 거의 유사한 측정결과를 보여주고 있다. 그러나 0.25cc 이상의 범위부터는 각각의 측정센서의 측정결과가 다소 분산됨을 확인할 수 있다. 특히, 측정센서의 길이가 7cm보다는 15cm로 측정된 유전율상수가 높게 나타남을 알 수 있다. 또한 15cm 길이의 측정센서에서 측정된 유전율상수가 Topp et al.(1980) 교정곡선과 흡사한 결과를 보이고 있지만, 포화된 흙 칼럼(체적함수비 0.40cc)에서는 다소 높은 값을 갖는다. 이러한 원인은 시험에 사용된 표준사의 입도가 자연조건의 흙에 비해 매우 균등할뿐만 아니라 유전율상수에 영향을 미치는 실트(silt) 내지 점토광물(clay minerals)을 거의 포함하고 있지 않기 때문인 것으로 판단된다.

결 언

이 연구에서는 지반을 이루는 다양한 매질의 고유 물성치인 유전율상수를 이용해 지반을 구성하는 매질에 대한 체적함수비 내지 다양한 물성치를 파악할 수 있는 유전율 장비인 Frequency Domain Reflectometry (FDR) system과 매질의 유전율상수를 측정할 수 있는 측정센서를 제안하였다. FDR 장비의 측정 주파수 범위는 0.1~1.7GHz이며, 입사파를 방향성결합기를 통해 동축케이블과 연결된 측정센서로 방출함으로써 매질에서 반사되어져 나온 반사파에 대해 스펙트럼분석기에서 주파수 파형을 분석하여 측정 대상매질의 유전율상수를 파악할 수 있는 장비이다.

FDR 장비를 적용해 3종류의 측정센서(7cm, 10cm, 15cm)에 대한 체적함수비와 유전율상수의 상관관계를 Topp et al.(1980) 교정곡선과 비교하여 검토한 결과, 체적함수비의 변화에 따라 유전율상수도 함께 변화함을 파악하였다. 특히, 체적함수비 0.25cc 이하에서는 Topp et al.(1980) 교정곡선과 3종류의 측정센서에서 측정된 유전율상수의 측정범위가 매우 유사함을 인지할 수 있었으나, 0.25cc 이상의 체적함수비 조건에서는 각각의 측정센서에서 측정된 측정치가 다소 차이를 보임을 파악하였다. 이러한 원인으로는 측정센서의 끝부분에서 방출되는 전자파가 매질 내에서 반사되어 측정센서로 되돌아가는데 걸리는 반응시간 상의 현상 및 측정센서의 측정로드부와 체적함수비를 가진 흙 시료의 접촉면적에 의해 나타나는 현상으로 판단된다.

이상과 같이 FDR 장비 및 측정센서를 검토한 결과, 유전율상수의 반응으로부터 매질의 체적함수비 측정은 정량적인 결과치를 얻을 수 있을 것으로 사료될 뿐 아니라 길이에 따른 측정센서의 결과치 또한 비교적 양호한 상관관계를 파악할 수 있었다. 그러므로 다양한 조건하에서의 시험에 적합한 길이의 측정센서를 사용함으로써 원활히 대상 매질의 유전율상수 내지 체적함수비 및 다양한 물성치를 파악할 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

이 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(지하매

에 의한 친환경적 수자원확보 기술적용, 과제번호 #3-6-2)에 의해 수행되었다. 연구비를 지원해준 사업 단측에 감사드린다.

참고문헌

- Ansoult, M., L.W. De Backer and M. Declercq, 1985, Statistical relationship between apparent dielectric constant and water content in porous media. *Soil. Sci. Soc.*, 49, p 47-50.
- Chan, C.Y. and R.J. Knight, 1999, Determining water content and saturation from dielectric measurements in layered materials, *Water Resources Research*, 35(1), p 85-93.
- Drenvich, V.P., S.I. Siddiqui, J. Lovell and Q. Yi, 2001, Water content and density of soil in situ by the Purdue TDR method, *Proceeding of the symposium TDR2001: Innovative Applications of TDR Technology*, Northwestern University, Evanston, Illinois.
- Head, K.H., 1980, *Manual of soil laboratory testing - volume 1 soil classification and compaction tests*, Engineering Laboratory Equipment Limited, p 339.
- Huisman, J.A., C. Sperl, W. Bouten and J.M. Verstraten, 2001, Soil water content measurements at different scales: accuracy of time domain reflectometry and ground-penetrating radar, *Journal of hydrology*, 245, p 48-58.
- Huisman, J.A., J.J.C. Snepvangers, W. Bouten and G.B.M. Heuvelink, 2002, Mapping spatial variation in surface soil water content: comparison of ground-penetrating radar and time domain reflectometry, *Journal of hydrology*, 269, p 194-207.
- Jackson, S.H., 2003, Comparison of calculated and measured volumetric water content at four field sites, *Agricultural water management*, 58, p 209-222.
- Jacobsen, O.H. and Schjønning, P., 1993, A laboratory calibration of time domain reflectometry for soil water measurement including effects of bulk density and texture, *Journal of Hydrology*, 151, p 147-157.
- Jones, S.B. and D. Or, 2001, Frequency-domain meth-

- ods for extending TDR measurement range in saline soils, Proceeding of the symposium TDR2001: Innovative Applications of TDR Technology, Northwestern University, Evanston, Illinois.
- Noborio, K., 2001, Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review, Computers and electronics in agriculture, 31, p 213-237.
- Topp, G.C., J.L. Davis and A.P. Annan, 1980, Electromagnetic determination of soil water content: Measurement in coaxial transmission lines, Water Resources Research, 16(3), p 574-582.

투 고 일 2004년 10월 27일
 심 사 일 2004년 10월 28일
 심사완료일 2004년 12월 1일

김만일
 한국수자원공사 수자원연구원
 305-811 대전광역시 유성구 전민동 462-1
 Tel: 042-860-0427
 Fax: 042-890-0592
 E-mail: mikim916@hotmail.com

정교철
 760-749 안동대학교 지구환경과학과
 경북 안동시 송천동 388번지
 Tel: 054-820-5753
 Fax: 054-823-1627
 E-mail: jeong@andong.ac.kr

박창근
 관동대학교 토목공학과
 210-701 강릉시 내곡동 522
 TEL : 033-670-3320
 Email : ckpark@kwandong.ac.kr