

# 토양오염도 측정을 위한 Frequency Domain Reflectometry with Vector Network Analyzer(FDR-V) system 적용성 평가

김만일, 김형수, 정교철\*

한국수자원공사 수자원연구원 지하수지반연구소

\*안동대학교 자연과학대학 지구환경과학과

e-mail : mikim916@hotmail.com

## 요 약 문

복소유전율상수인 실수부(Real part)와 허수부(Imaginary part)를 측정하기 위하여 Frequency Domain Reflectometry with Vector Network Analyzer(FDR-V) 측정 장비로 1~18GHz 범위 내에서 매질의 기본 구성단위인 공기, 물, 흙입자에 대한 기본적인 유전율 특성을 파악하고, 이들로부터 다공질 매질내 유류 오염물질의 함유 특성을 측정할 수 있다. 또한 제작된 시료에 대한 포화도와 1GHz 범위에 분포하는 실수부 유전율상수와와의 관계로부터 매질의 공극내 함유된 물질의 유전율상수 특성에 매우 민감한 반응을 보이므로, 이들로부터 매질의 공극률 내지 유효공극률의 측정이 가능할 것으로 사료된다.

주요어: FDR-V system, 복소유전율상수, 체적함수비, 체적함유비

## 1. 서론

지반을 구성하고 있는 매질에 대한 체적함수비 및 포화도 측정은 강우에 의한 지하수 함양, 절토 사면 파괴 및 오염물질의 침투 이동 경향 등을 이해하는데 매우 중요한 물성치이다. 이러한 지반의 물성치들을 파악하기 위한 방법인 전자파를 이용한 유전율법은 지반 구성 매질이 갖는 고유의 유전율상수 특성 반응에 따라 평가되어지므로 다양한 분야에 적용되고 있다. 지반을 구성하고 있는 다양한 매질에 대한 유전율 특성을 이용하여 지반의 물리적 성질을 파악하는 유전율 측정법은 Time Domain Reflectometry(TDR)<sup>1)</sup>, Amplitude Domain Reflectometry(ADR)<sup>2,3)</sup> 및 Frequency Domain Reflectometry(FDR)<sup>4)</sup> 등으로 크게 분류할 수 있다. 특히, TDR 측정법은 현장의 체적함수비 및 토양 오염의 정도를 측정하기 위해 다방면으로 응용되고 있으며<sup>5),6),7)</sup>, 강우에 의한 사면파괴를 정량적으로 파악하기 위해 강우 침투에 따른 사면에서의 함수비 측정이 가능한 ADR 측정법을 이용하여 함수비 모니터링과 사면파괴 해석에도 적용되었다. 또한 FDR 측정 장비는 실내시험을 통해 매질의 체적함수비, 염분농도 및 유류 오염도 등의 측정 가능성을 확인하였다. 본 연구에서는 불포화영역 내에서 다공질 매질의 기본적인 유전율상수 값을 이용하여 오염된 시료의 유전율상수 변화로부터 대상 매질의 오염도 등의 측정 가능성 및 이를 측정하기 위한 Frequency Domain Reflectometry with Vector Network Analyzer(FDR-V) 측정 장비의 적용성을 실내 칼럼시험을 통하여 평가하였다.

## 2. FDR-V 측정 장비의 구성

유전율 측정법은 지반을 구성하는 다공질 매질의 전자파 반응에 따라 유전율상수 특성을 이용하는 방법이다. 본 연구에 적용된 유전율 측정 장비는 Frequency Domain Reflectometry with Vector Network Analyzer(FDR-V)로 측정 주파수 1~18GHz 범위 내에서 매질의 유전율을 신속하게 측정할 수 있는 장치이다. 측정 장비의 구성은 기본적으로 벡터 네트워크 어날라이저(Vector Network Analyzer, VNA), 스위치 유닛(Switch Unit, SU), 그리고 동축측정프로브(Coaxial Measurement Probe, CMP)의 총 세 가지의 장비로 이루어져 있다(Fig. 1). 매질에 삽입 설치되는 CMP는 50Ω의 동축 전송선 (Coaxial Transmission Line, CTL)에 접속되어 있으며, VNA 및 SU를 자료수집기(Data logger)와 GP-IB로 연결하여 SU의 각 채널의 컨트롤 및 CMP에서 측정된 데이터를 저장할 수 있는 기능을 수행한다.

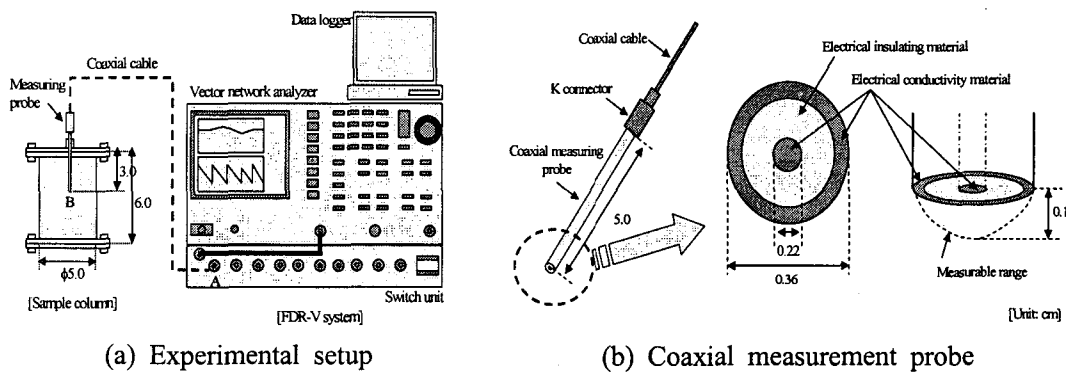


Fig. 1. Schematic diagram of the FDR-V system.

유전율상수의 측정 과정은 Fig. 1에서와 같다. VNA에서 발생된 전자파를 본체의 A지점인 SU으로 전달하고, 여기서 각 채널의 포트를 통하여 CTL을 따라 CMP의 측정부분에 전달된다. 시료 내부까지 전달된 전자파는 유전율 측정부분인 CMP 끝부분의 B지점에서 완전히 반사되어 SU으로 되 돌아간다. SU에서는 증폭기와 방향성 결합기가 내장되어 있으며, 반사파와 직진파를 선별하여 반사파만이 증폭되어 VNA에서 각각의 주파수 영역에 대해 실수부 (Real part,  $\epsilon'$ )와 허수부 (Imaginary part,  $\epsilon''$ )의 유전율상수가 측정된다. 일반적으로 유전율상수는 하나의 주파수 범위에서 반사되는 매질의 특성을 갖는 실수부 유전율상수 (real part of dielectric constant)와 매질의 측정부분에서 흡수되어 감쇠되는 허수부 유전율상수 (imaginary part of dielectric constant)로 쌍을 이루어 존재하는데, 이들을 복소유전율상수 (complex dielectric constant)라고 한다.<sup>8)</sup> 따라서 측정 대상 매질의 성질에 따라서 복소유전율상수는 상대적인 측정 범위를 나타낸다. 또한, VNA는 전자파 측정물질 내의 반사계수를 S 파라미터에 의해 직접 구해지기 때문에, 어떠한 물질에 대해서도 유전율의 측정이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 또한, 측정 주파수범위가 1GHz 에서 18GHz까지 매우 광범위하게 넓기 때문에, 지금까지 측정이 불가능했던 다양한 매질에 대한 유전율상수의 측정 및 흙 입자 구조 내지 내부에 존재하는 미량의 수분량의 측정에도 적용할 수 있는 가능성도 가지고 있다. 본 연구에서는 동일한 시험 조건하에서 실내시험을 수행하기 위하여 측정시료의 제작은 표준사를 공극률 0.40으로 일정하게 압밀시켜 직경 5.0cm, 높이 6.0cm 크기의 아크릴 깔럼에 넣어 제작하였다. 그리고 측정센서는 깔럼 상단의 중앙부에 수직으로 3cm 가량 삽입한 후 매질의 복소유전율상수를 측정하였다. 특히 유전율은 주변 온도에 영향을 많이 받기 때문에 본 시험에서는 실내 온도를 20°C로 일정하게 유지시킨 상태에서 각 매질에 대한 시험을 수행하였다.

### 3. 매질의 유전율상수 측정

불포화 조건하에서 오염된 흙시료를 구성하는 기본적인 매질인 물, 흙, 공기, 등유에 대해서 FDR-V 측정법을 이용한 복소유전율상수를 파악하고, 각 매질 특성의 측정 가능성에 대해 검토하였다. Fig. 2는 측정 주파수와 복소유전율상수의 관계를 도시한 것으로, 물, 흙, 공기 및 등유에 대한 유전율상수를 고려해 볼 때, 물의 결과를 제외하고는 대부분 0~2 사이에서 복소 유전율상수 범위가 비슷하게 존재하는 것을 알 수 있다. 주파수 형태의 특징적인 변화로부터 각 주파수 별로 복소유전율상수의 획득이 용이하며, 또한 복합적인 매질에서의 각 매질에 대한 특징을 유전율 반응을 고려해 파악하는 것이 가능할 것으로 판단된다.

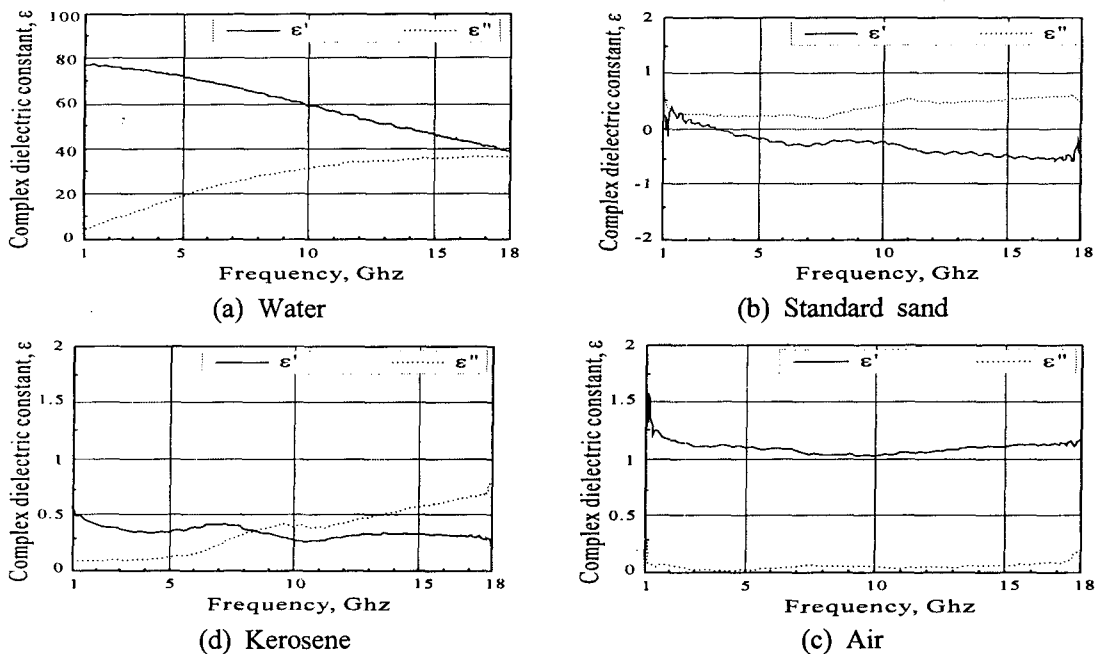


Fig. 2. Calibration results of porous media under FDR-V system.

### 4. 오염시료에 대한 교정작업

표준사에 대해 물, 등유, 물과 등유를 혼합한 시료 등을 압밀시켜 제작한 흙시료를 대상으로 복소유전율상수 변화를 측정하고, 이러한 오염시료에 대한 복소유전율상수와 포화도에 대한 교정작업을 수행하였다. 이들의 변화를 측정하기 위해, 공극률 0.40, 압밀 정도는  $\rho_d = 1.5g/cm^3$ 으로 일정하게 유지하면서 불포화 흙시료를 제작하였다.

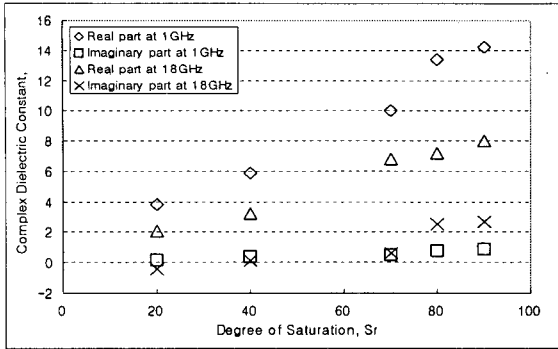


Fig. 3. Sr(water) vs. □.

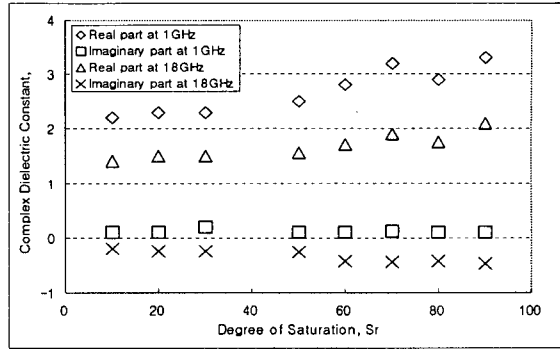
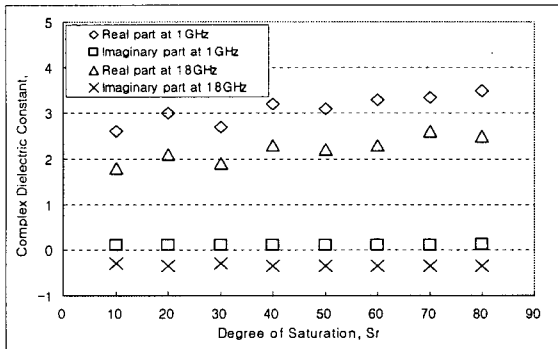
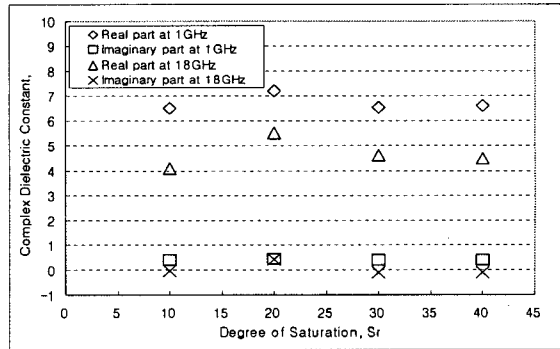


Fig. 4. Sr(kerosene) vs. □.



(a) Sr(water) 10%



(b) Sr(water) 50%

Fig. 5. Response of mixed water and kerosene.

본 연구에서는 CMP의 교정작업을 위해 본 연구에서는 아세톤(acetone)을 표준 교정용액으로 사용하였으며, 측정시의 시료 및 실내온도는 20°C로 일정하게 유지시켰다. 물, 등유를 함유한 시료는 각각의 포화도 0%~90%까지 10%씩 변화시키며 총 20개의 시료를 제작하였다. 또한 물과 등유가 혼합되어진 흡시료의 경우, 물의 포화도를 10%에서 80% 범위에서 각 10%씩 증가시켰으며, 각각의 물의 포화도에 따라 등유의 함유 정도도 10%씩 증가시켜 제작된 시료의 총 포화도가 90%범위까지로 설정하여 총 36개의 불포화 시료를 각기 제작하였다.

이렇게 제작된 흡시료에 대해 각 포화도와 복소유전율상수의 관계에 대한 결과를 Fig. 3, 4, 5에 도시하였다. 물을 함유한 흡시료에서는 포화도의 증가에 따라 1GHz와 18GHz에서만의 실수부 및 허수부의 측정 결과가 등유를 함유한 시료보다 급격한 차이를 보이고 있다. 이는 시료에 첨가된 물의 유전율상수가 등유보다 매우 크기 때문에(Fig. 2(a), (d)) 나타나는 현상으로써 유전율의 반응이 흡입자 보다는 흡의 공극내에 함유된 물질에 의해 좌우된다는 것을 의미한다. 또한 Fig. 5에서와 같이 물과 등유로 혼합된 시험에서도 물과 등유의 혼합비율에 따라서도 유전율상수의 변화가 민감하게 작용하는 것을 나타내고 있다. Fig. 6에서는 1GHz에서의 복소유전율상수 실수부( $\epsilon'_{1GHz}$ )와 물의 포화도 관계만을 대상으로 교정곡선으로 나타내었다. 이 교정곡선으로부터 식 (1)에서 표준사에 대한 3차원 방정식을 유도하였다.

$$\epsilon'_{1GHz} = 3.0 \times 10^{-6} Sr^3 + 5.0 \times 10^{-4} Sr^2 + 8.0 \times 10^{-2} Sr + 1.4 \quad (\text{상관계수 } R^2 = 0.99) \quad (1)$$

Fig. 6과 식(1)로부터  $\epsilon'_{1GHz}$ 에 대한 결과만으로 매질의 포화도를 신속히 파악할 수 있으므로, 따라서 다양한 다공질 매질에 대한 시험결과를 Fig. 6과 함께 도시할 경우에 복소유전율상수 반응만으로 대상 매질에 대한 포화도 내지 체적함수비 등의 물성치 파악이 신속히 이루어질 것으로 사료된다.

### 5. 결론 및 고찰

본 연구에서는 고주파수 범위인 1~18GHz 범위 내에서 선별적으로 실수부(Real part) 및 허수부(Imaginary part)의 복소유전율상수를 동시에 측정할 수 있는 FDR-V 측정 장비를 사용하여 등유를 함유한 불포화 매질에 대한 유전율 반응을 측정하였다. 일반적으로 다공질 매질에 대한 유전율상수 반응으로부터 대표적으로 체적함수비의 측정이 이루어지고 있으나, 본 연구에서는 매질의 기본 구성 단위인 공기, 물, 흙입자들의 유전율상수로부터 오염물질의 주입에 따른 매질의 복소유전율상수 변화 특성을 파악하였다. 이러한 매질의 측정 결과에서 등유의 체적함수비(Volumetric oil content) 변화 정도에 따라 선별적인 주파수 범위인 1GHz 및 18GHz에서 복소유전율상수의 변화를 충분히 확인 할 수 있었으며, 특히 실수부 1GHz의 복소유전율상수 증가에 따른 포화도 관계로부터 대상 매질의 공극내 존재하는 물질의 유전율상수 특성에 매우 민감하게 반응하는 것을 파악하였다. 이러한 현상은 매질의 공극률과 유효공극률에 의해 영향을 받기 때문에 기본적인 다공질 매질의 유전율상수 특성을 이용한 다양한 연구가 요구된다.

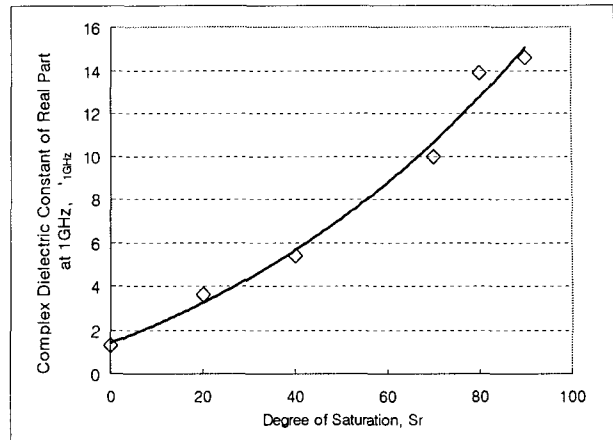


Fig. 6. Relationship between Sr and  $\epsilon'_{1GHz}$ .

### 사사

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제 번호: 3-4-2)에 의해 수행되었다. 연구비를 지원해준 사업단 측에 감사드린다.

### 참고문헌

- 1) Topp, G.C., Davis, J.L., and Annan, A.P., Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines, *Water Resources Research*, 16(3), 574-582, 1980.
- 2) Miller, J.D., and Gaskin, G.J., The development and application of the ThetaProbe soil water sensor, MLURI Technical Note, Macaulay Land Use Research Institute, Aberdeen, U.K., 1996.
- 3) Gaskin, G.J., and Millker, J.D., Measurement of soil water content using a simplified impedance measuring technique, *Journal of Agricultural Engineering Research*, 63(2), 153-159, 1996.
- 4) 김만일, 정교철, 박창근, 지하땀 지반 물성치 측정을 위한 유전율 측정 시스템 개발, *지질공학*, 14(4), 361-369, 2004.
- 5) Jackson, S.H., Comparison of calculated and measured volumetric water content at four field sites, *Agricultural water management*, 58, 209-222, 2003.
- 6) Huisman, J.A., Snepvangers, J.J.J.C., Bouten, W., and Heuvelink, G.B.M., Mapping spatial

variation in surface soil water content: comparison of ground-penetrating radar and time domain reflectometry, *Journal of hydrology*, 269, 194-207, 2002.

- 7) Mojid, M.A., Wyseure, G.C.L., and Rose, D.A., The use of insulated time-domain reflectometry sensors to measure water content in highly saline soils, *Irrigation Science*, 18, 55-61, 1998.
- 8) Bekefi, G., and Barrett, A.H., *Electromagnetic vibrations, waves, and radiation*, Cambridge, MA: MIT Press, 418-420, 1987.