

주파수영역 스펙트럼 반응을 이용한 불포화토의 염분농도 측정에 관한 연구 Spectrum response of frequency range for the unsaturated soil by salinity concentration

김만일¹⁾, Man-Il Kim, 정교철²⁾, Gyo-Cheol Jeong, 김형수³⁾, Hyung-Soo Kim, 석희준⁴⁾, Heejun Suk

¹⁾ 한국수자원공사 수자원연구원 지하수지반연구소 박사후연구원, Post-Doctoral Researcher, Groundwater & Geotechnics Research Center, Korea Institute of Water and Environment, KOWACO

²⁾ 안동대학교 자연과학대학 지구환경과학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Earth & Environmental Science, Andong National University

³⁾ 한국수자원공사 수자원연구원 지하수지반연구소 소장, Director, Groundwater & Geotechnics Research Center, Korea Institute of Water and Environment, KOWACO

⁴⁾ 한국수자원공사 수자원연구원 지하수지반연구소 선임연구원, Senior Researcher, Groundwater & Geotechnics Research Center, Korea Institute of Water and Environment, KOWACO

SYNOPSIS : In this study we carried out to evaluate the salinity concentration and volumetric water content of unsaturated soil column using frequency domain Reflectometry with vector network analyzer (FDR-V) measurement system. All of experiments were considered to the effect of temperature which ranges from 10°C to 50°C increasing the interval of 10°C controlled by the constant temperature container. From the results the responses of complex dielectric constant which consist of the real part and imaginary parts have the effect of volumetric water content and concentration of salinity at 1GHz. Use of derived equations (1) and (2) can be calculated the physical parameters such as volumetric water content and salinity concentration of unsaturated media by the responses of complex dielectric constant.

Keywords : 복소유전율상수, 염분농도, 체적함수비, FDR-V system

1. 서 론

다양한 다공질매질로 이루어진 지반은 불포화 및 포화 상태로 존재하고 있다. 이들은 다양한 형태의 물질 이동 경로를 제공하여 강우에 의한 지하수의 함양 및 오염물질 등의 침투에 의해 지반 환경오염 문제에 노출되어 있다. 따라서 이러한 다공질매질의 물리적 특성을 정량적으로 파악함으로써 지반의 효율적인 이용·관리에 적용할 필요성이 요구된다. 또한 지반을 구성하는 매질이 지니고 있는 체적함수비는 흡입자를 제외한 공극 내에 존재하는 공기와 물의 관계로 고려할 수 있다. 이러한 체적함수비를 측정하기 위한 시도는 Topp *et al.* (1980)에 의해 제안된 Time Domain Reflectometry (TDR) 측정법을 들 수 있다. 이를 이용해 지반의 효율적인 체적함수비의 측정이 가능해졌으며, 최근에는 사면 및 댐의 안정성 평가, 그리고 지반의 유류오염 등에 대한 측정 가능성도 함께 연구되어지고 있다 (김만일 등, 2005; Wilson *et al.*, 1995; Chenaf and Amara, 2001; Gorski *et al.*, 2001). 이와 같이 유전율 특성으로부터 지반의 물성치를 파악할 수 있는 가장 주요한 요인 중의 하나는 물의 유전율상수가 기타 다른 매질

에 비해 매우 높은 값을 가지고 있을 뿐만 아니라 매질이 가진 공극을 통해 물질 이동이 이루어지고 있기 때문이다(Santamarina *et al.*, 2001). 특히 현재 문제시 되고 있는 지반의 염분화 문제는 지하수의 과잉 채수로 인해 발생되고 있으며 지반 염분화 범위는 증가되고 있는 실정이다. 따라서 지하수를 이용하는 지역 내에서 실시간 원위치 모니터링 기술과 이를 효율적으로 측정할 수 있는 측정장치 및 측정방법이 요구된다. 이를 위해 본 연구에서는 고주파수 전자기파를 사용하여 매질의 복소유전율상수(complex dielectric constant)를 측정할 수 있는 Frequency Domain Reflectometry with Vector Network Analyzer (FDR-V) 측정장치를 이용하여 온도 변화에 따른 염분농도 측정 가능성에 대해 실내시험을 수행하여 복소유전율상수의 실수부(real part)와 허수부(imaginary part)에서 보다 정밀하게 염분농도를 측정할 수 있는 측정기법을 정립하였다.

2. 시료 및 시험방법

2.1 시료

본 시험에 사용된 흙시료는 표준사(Standard Sand)를 사용하여 동일한 공극률(Porosity, $n = 0.40$) 상태에서 체적함수비와 염분농도를 단계적으로 변화시켜 복소유전율상수를 측정하는 시험이다. 그림 1은 표준사에 대한 입도분석 결과를 보여준다. 표준사의 경우 99.9%가 균질한 모래(2~0.06mm 통과분)이며 단 0.1%만이 실트(0.06~0.002mm 통과분)로 이루어져 있는 것으로 측정되었다. 비중시험 결과, $2.65\text{g}/\text{cm}^3$ 로 측정되었다.

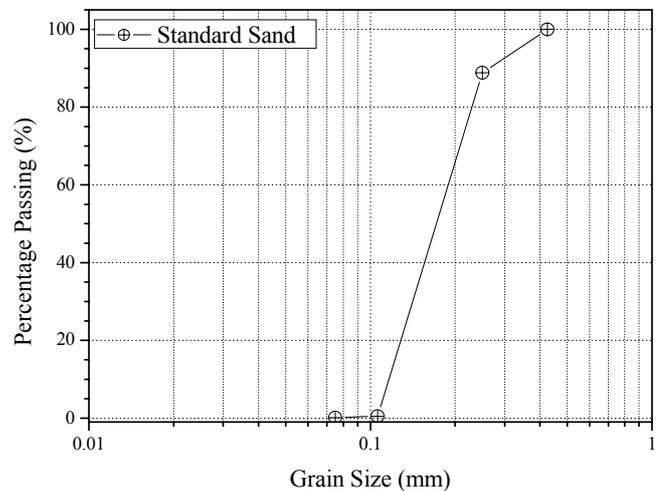


그림 1. 표준사의 입도분포곡선

2.2 시험방법

시험방법은 표준사에 대해 염분농도를 0%, 0.1%, 0.5%, 1%, 5%의 염분수를 각각 체적함수비 0.07, 0.15, 0.22, 0.29, 0.40의 조건으로 높이 30mm, 내경 50mm의 아크릴몰드를 제작·이용하여 건조밀도가 약 $1.6\text{g}/\text{cm}^3$ 가 되도록 압밀하여 각각 제작하였다(그림 2).

다음으로 작성된 시료를 항온조에 설치하고 온도를 10°C 에서 50°C 까지의 측정 범위를 설정한 후 온도를 10°C 간격으로 상승시켜 가면서 시료의 복소유전율상수(complex dielectric constant)인 실수부(real part)와 허수부(imaginary part)의 상수값을 측정주파수 1GHz에서 18GHz까지의 고주파수 범위에서 측정하였다. 즉, 시료에 대해 한번 측정하였을 때마다 실수부와 허수부의 2종류의 복소유전율상수가 측정되는 것이다. 본 측정장비의 주 측정부인 동축케이블과 측정프로브의 경우 이들 자체의 온도의존성을 가지고 있기 때문에 시료 몰드에 측정프로브를 설치한 상태에서 온도를 상승시켜도 측정오차를 포함하고 있다. 따라서 이러한 온도에 따른 측정오차를 최소화하기 위하여 측정방법은 각 온도 범위에 도달할 때, 시료 몰드를 항온조에서 꺼내어 몰드 상부의 덮개에 설치된 측정부를 통해 측정프로브를 삽입하여 총 5개 지점에 대한 복소유전율상수를 측정하였다. 이렇게 측정된 총 5개의 측정 결과를 평균하여 시료의 고유 복소유전율상수를 유도하였다. 또한 총 18GHz까지의 측정 자료를 각 1GHz 단위로 선별하여 실수부와 허수부에 대한 시료의 유전율 특성을 파악하였다.

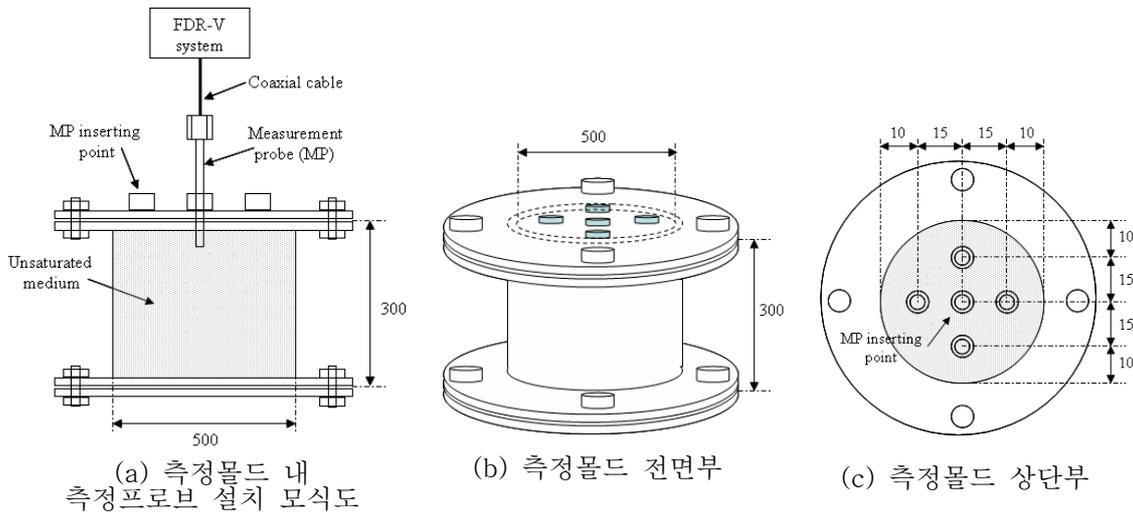


그림 2. 측정장치 설치 및 아크릴 몰드의 모식도 (단위: mm)

3. 시험결과

3.1 복소유전율상수 실수부와 물성치의 관계

FDR-V 측정장비의 측정 주파수 범위인 1GHz에서 18GHz에 대한 복소유전율상수의 스펙트럼이 체적함수비, 온도, 염분농도의 차이에 따라 복소유전율상수의 변화를 검토하였다. 그 결과 복소유전율상수의 실수부는 온도, 염분농도의 변화에 대해서 대부분 영향을 받기 때문에 체적함수비에 대해서 뿐만 아니라 큰 영향을 받는 것을 확인할 수 있었다. 여기서 복소유전율상수 실수부의 스펙트럼을 그림 3에 나타내었다. 그림 3에서 보는 바와 같이 체적함수비가 증가할수록 복소유전율상수 실수부의 측정치가 증가함을 알 수 있다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 물이 갖고 있는 쌍극자 모멘트 결합구조에 의한 영향을 크게 받기 때문이다. 또한 여기서 한 가지 주목해야 할 부분은 염분농도가 증가할수록 측정된 실수부의 값도 함께 증가하는 경향을 보인다.

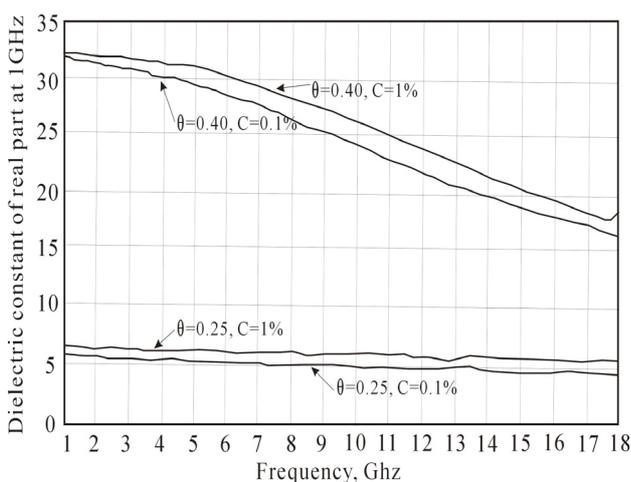


그림 3. 염분농도에 따른 복소유전율상수 실수부와 측정주파수의 관계

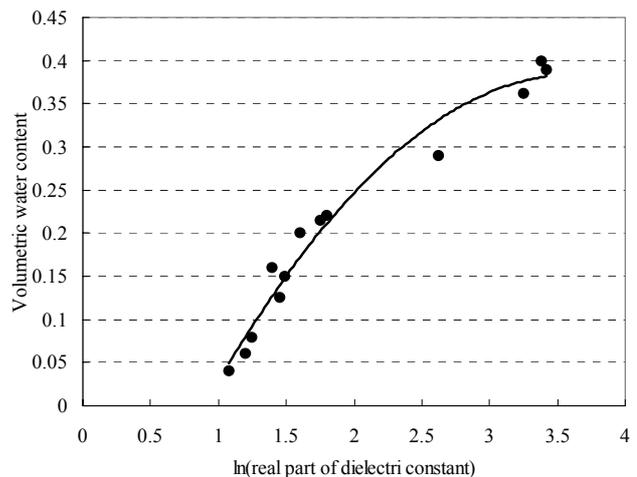


그림 4. 복소유전율상수 실수부 1GHz와 체적함수비의 관계

그림 4에서는 복소유전율상수 1GHz의 실수부 측정치를 체적함수비와의 관계로 나타낸 것으로써 체적함수비 증가에 따른 실수부 측정치도 함께 증가한다. 이로부터 1GHz 실수부 측정치로 체적함수비의 측정이 가능할 것으로 판단된다. 이들 관계를 회귀분석을 하여 3차원 다항식으로 아래와 같이 유도하였다.

$$\theta = 0.04 \{ \ln(\epsilon'_{1G}) \}^3 - 0.31 \{ \ln(\epsilon'_{1G}) \}^2 + 0.88 \ln(\epsilon'_{1G}) - 0.60 \quad [R^2 = 0.99] \quad (1)$$

여기서 θ 는 체적함수비이고, ϵ'_{1G} 는 1GHz 실수부의 복소유전율상수를 의미한다.

3.2 복소유전율상수 허수부와 물성치의 관계

다음으로 염분농도와 체적함수비에 대한 복소유전율상수 허수부의 스펙트럼 반응에 대해서 검토하였다. 측정 결과에서 허수부는 체적함수비, 염분농도, 온도 변화에 대해서 큰 영향을 받는 것으로 확인되었다. 체적함수비와 복소유전율상수 허수부에 대한 스펙트럼 변화를 그림 5에 도시하였다. 실수부의 측정결과와 비교해 볼 때, 체적함수비와 염분농도의 증가에 따른 스펙트럼 측정결과도 비슷하게 증가하는 것으로 측정되었다. 특히 허수부 결과 중 1GHz와 18GHz 상에서의 측정치 범위 폭이 넓게 나타난 것으로 보아 이들 주파수 영역에서 체적함수비와 염분농도 측정 가능성이 매우 높은 것으로 판단된다. 또한 이들 결과를 토대로 그림 6에서는 1GHz의 허수부 측정치와 염분농도의 관계를 고려하여 볼 때, 시료 내의 체적함수비 증가에 따라 측정치가 선형으로 나타나며, 그 기울기는 완만해지는 것을 확인하였다.

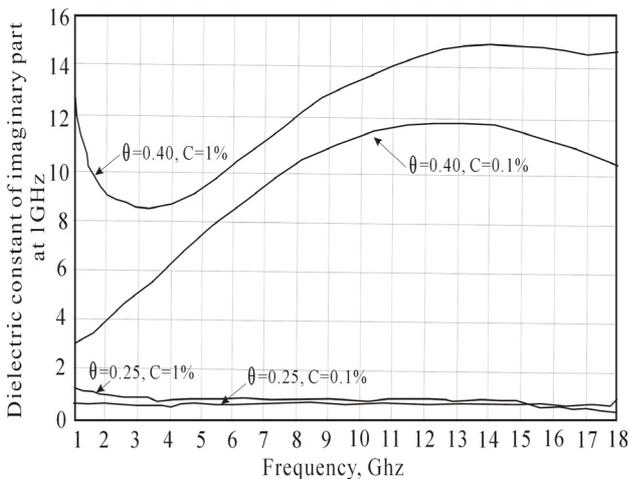


그림 5. 염분농도에 따른 복소유전율상수 허수부의 관계(염분농도 및 체적함수비 조절)

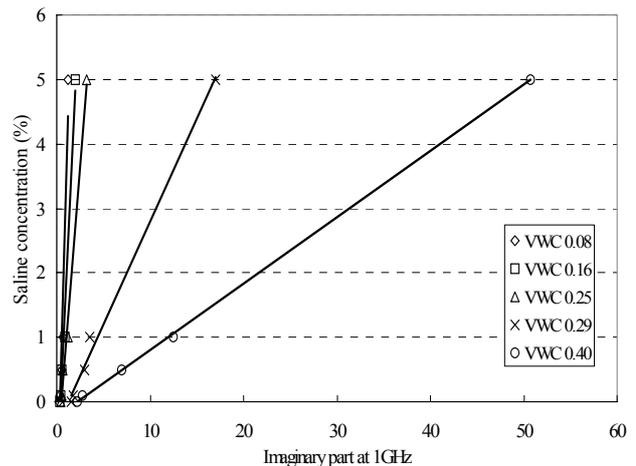


그림 6. 복소유전율상수 허수부 1GHz와 염분농도와의 관계(VWC: 체적함수비, cc/cc)

복소유전율상수 1GHz의 허수부에 대한 온도와 관계에서 온도 상승에 따른 허수부 측정치도 함께 상승하는 것을 알 수 있다. 특히 이러한 변화는 체적함수비가 높은 조건에서 측정치의 증가폭이 높게 나타났다. 따라서 그림 5, 6, 7의 1GHz 허수부 측정치 결과를 종합해 볼 때, 이들이 체적함수비, 염분농도, 온도 변화에 대해서 양호한 의존성을 가지고 있는 것으로 판단된다. 염분농도를 산정하는 교정방정식은 체적함수비, 온도, 복소유전율상수 1GHz의 허수부 측정치를 포함하는 식으로 나타낼 수 있다. 그림 6의 결과인 각 체적함수비에 따른 1GHz 허수부 측정치를 각 온도에 대해서 비교하고, 그 경사를 분석한 결과, 염분농도는 의 각 파라메타에 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 이러한 복소유전율상수 허수부의 측정치로부터 염분농도를 산정하기 위해 다중회귀분석을 수행한 결과, 아래 식을 유도하였다.

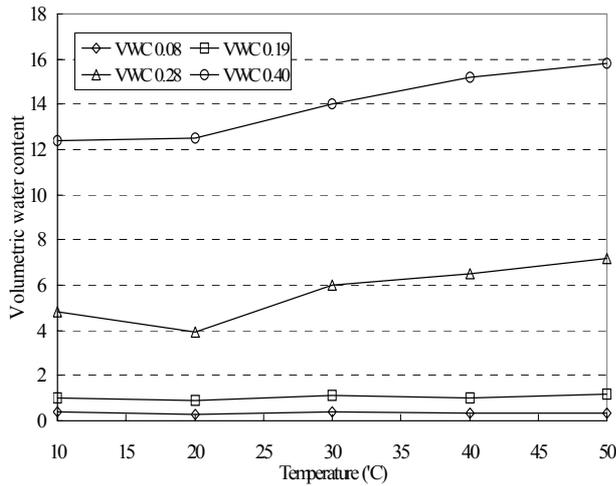


그림 7. 온도 변화에 따른 복소유전율상수 허수부 1GHz 양상

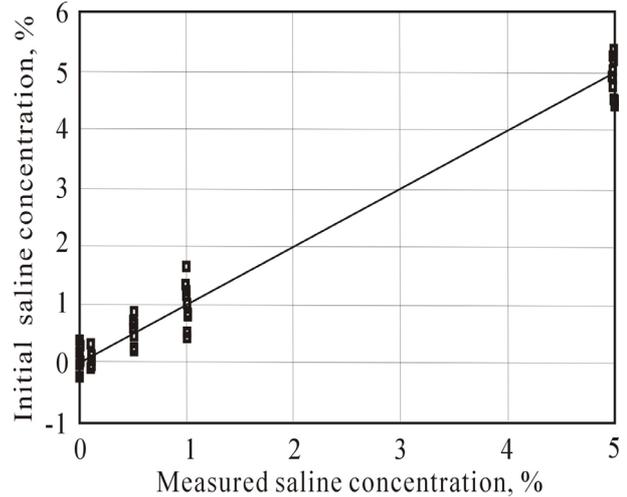


그림 8. 초기 설정치 및 측정치 염분농도의 관계(복소유전율상수 허수부 1GHz)

$$C = 0.05\theta^2 T_{\lambda}'' + 51.95\theta^2 \varepsilon_{\lambda}'' - 0.02\theta T_{\lambda}'' - 37.82\theta \varepsilon_{\lambda}'' + 6.94\varepsilon_{\lambda}'' - 0.30 \quad [R^2=0.99] \quad (2)$$

여기서 C 와 T 는 염분농도와 측정온도를 의미하며, ε_{λ}'' 은 1GHz 허수부의 복소유전율상수이다.

그러므로 측정된 염분농도와 식 (2)에 의해 구해진 염분농도와 초기 설정 염분농도와의 관계를 함께 비교한 결과를 그림 8에 나타내었다. 식 (1)과 (2)에 따라 FDR-V 측정장비로 측정된 복소유전율상수의 결과와 대상 매질의 온도를 측정한다면 이들 측정치로부터 체적함수비(θ)와 염분농도(C)의 측정이 가능할 것으로 판단된다.

4. 결론 및 고찰

본 실험연구에서는 복소유전율상수는 체적함수비, 염분농도, 온도에 대해 매우 민감하게 영향을 받는 것을 확인하였다. 특히 변화가 측정주파수 영역인 1GHz의 복소유전율상수에 대해서는 실수부(real part)에서 체적함수비에 대해 큰 의존성을 보이고 있으며, 허수부(imaginary part)의 경우에는 체적함수비, 염분농도, 온도에 대해 전체적으로 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 따라서 이러한 결과들을 토대로 볼 때, 복소유전율상수 실수부와 허수부의 1GHz 범위 내에서 체적함수비, 염분농도를 구하는 교정방정식을 유도하여 측정된 복소유전율상수를 이용함으로써 매질의 체적함수비 내지 염분농도의 신속한 측정이 가능할 것이다. 이후의 연구과제로써는 측정주파수 1GHz에서 18GHz의 전 주파수 범위의 스펙트럼을 이용하여 온도를 구하는 교정방정식에 대해서 검토가 필요할 것으로 사료된다. 또한 염분농도뿐 아니라 기타 다양한 오염물질에 대해서도 각각의 의존성에 대해 검토되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 일부 연구비 지원(대수층 활용 상수도 공급 시스템 개발, 과제번호 3-4-2)에 의해 수행되었다. 연구비를 지원해준 사업단 측에 감사드린다.

참고문헌

1. 김만일, 김형수, 정교철, 2005, 토양오염도 측정을 위한 Frequency Domain Reflectometry with Vector Network Analyzer system 적용성 평가, 한국지하수토양환경학회 춘계학술발표회, 36-41.
2. Chenaf, D., and N. Amara, 2001, Time domain reflectometry for the characterization of diesel contaminated soils, Proceeding of the symposium TDR 2001: Innovative Applications of TDR Technology, Infrastructure Institute, Northwestern University, Evanston, Illinois, September 5-7, 2001.
3. Gorski, B. P., B. Tisch, T. Anderson, K. Judge and K. Tarr, 2001, Time domain reflectometry to monitor tailings dam stability, Proceeding of the symposium TDR 2001: Innovative Applications of TDR Technology, Infrastructure Institute, Northwestern University, Evanston, Illinois, September 5-7, 2001.
4. Santamarina, J. C., K. A. Klein and M. A. Fam, 2001, Soils and waves, John Wiley & Sons, 488p.
5. 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(3), 574-582.
6. Wilson, L. G., L. G. Everett and S. J. Cullen, 1995, Handbook of vadose zone characterization & monitoring: Part V- Preliminary monitoring-related activities (Ch. 12), Lewis Publishers, USA, 177-188.