

지하투과레이다를 이용한 비피압대수층의 지하수면 추정

Ground Penetrating Radar Profiling of an Unconfined Aquifer for Estimating the Groundwater Surface

박인찬* · 김지태** · 조원철***

Park, Inchan · Kim, Jitae · Cho, Woncheol

요 지

현재 다양한 분야에서 널리 사용되고 있는 지하투과레이더(Ground Penetrating Radar, GPR)를 이용하여 지하수면 및 함수량을 추정하였다. 비피압대수층 내에서의 얇은 포화대(saturated zone) 깊이를 산정하는 연구(Iivari and Doolittle, 1994; van Overmeeren, 1994)와 포화대 상부 습윤대(wetting fronts)의 거동을 조사한 연구(Vellidis et al., 1990) 등에 활용된 바 있는 GPR 기술을 바탕으로 비피압대수층의 통기대와 포화대 내의 함수량 및 지하수면 추정을 위한 기초 실험을 수행하였다. 지하수면 및 함수량의 현장 적용성을 검증하기 위해서는 시간과 경제적인 면에서 비효율적인 점을 고려하여 사질토로 구성된 실험용 토조를 제작하여 건조시 획득된 GPR 자료, 지하수면의 변화에 따른 GPR 이미지를 비교하여 그 적용성을 검토하고 시·공간적 지하수면의 정확한 추정을 위해서 삼차원으로 비교·검토할 수 있도록 하였으며, GPR 자료의 정확성을 검증하기 위해서 토조 하부에 액주계(piezometer)를 설치하였다. 본 연구에서 적용된 GPR 실험은 획득된 이미지의 해석에 다소 어려움이 있지만 토양을 교란시키지 않고 비교적 간편하게 함수량 및 지하수면의 위치를 파악하는데 매우 효과적이며, 추가적으로 GPR을 이용한 다양한 실험이 수행된다면 GPR 기술은 향후 기존 방법에서 쉽게 판단하기 어려운 시·공간적인 함수량 및 지하수의 분포 특성을 효율적으로 파악하는데 매우 큰 도움을 줄 수 있을 것이다.

핵심단어 : 지하투과레이다, 비피압대수층, 지하수면, 함수량, 통기대, 포화대

1. 서 론

지표하 천층에 존재하는 수분의 이동은 지하수문학 및 지하환경수문학에 있어서 상당한 중요성을 지닌다. 토양 내의 수분은 지표면을 통한 유입과 지표에서의 증발산량 및 배수 등에 의한 수분의 유출을 지배하는 여러 요인들에 의해서 결정된다. 수문순환에 있어서 토양수분은 매우 작은 요소이지만 농학, 생태학, 기상학, 등에서는 필수적으로 중요한 부분을 차지하고 있으며, 토양수분의 변화에 따른 지하수원의 효율적인 관리나 유역 내 홍수위험성 예측 등의 목적 외에도 수문성분의 정확한 해석을 위해서 토양 내 수분량 부존 및 유동에 관한 정성적, 정량적 분석을 수행하는 것은 매우 중요한 과제이며, 이러한 분석을 위한 효율적인 측정방법의 개발 또한 시급히 해결되어야 할 부분이다.

일반적으로 토양수분 함량을 측정은 크게 직·간접적 방법으로 대별된다. 직접적인 방법에는 Oven-drying method이 대표적이며, Gamma Radiation attenuation을 분석하여 측정하는 neutron Probe 분석, 매질의 유전율을 이용하는 TDR분석, 그리고 토양의 전기전도도를 이용하여 측정하는 전자기유도 측정 방법 등이 간접적인 방법에 속한다. Oven-drying 분석과 TDR을 이용하는 방법은 토립자를 교란시키는 문제

* 정회원 · 연세대학교 대학원 토목공학과 박사과정 · E-mail : icpark@yonsei.ac.kr - 발표자
** 정회원 · 연세대학교 대학원 토목공학과 박사과정 · E-mail : jtkim@yonsei.ac.kr
*** 정회원 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수 · E-mail : woncheol@yonsei.ac.kr

점을 갖고 있으며, 방사능을 이용한 Neutron Probe 방법은 토양의 화학적 변화를 야기할 수 있다는 단점이 있다. 반면 전자기 유도측정 방법은 지표면과의 직접적인 접촉이 없기 때문에 토양의 물리적, 화학적 구조를 손상을 주지 않으면서 보다 신속한 측정을 할 수 있다. 최근의 지진파 반사법(seismic reflection method)과 GPR 탐사 방법을 이용하여 광범위한 범위의 지하수면 변화 및 함수량 측정을 매우 효과적으로 적용되고 있는 추세이다. 이 방법은 시간과 경제적인 측면에서 매우 효과적이며, 특히 비피압대수층의 지하수 펌프로 인한 얕은 포화대 변화를 산정하는 연구(Iivari and Doolittle, 1994; van Overmeeren, 1994)와 포화대 상부 습윤대의 거동을 조사한 연구(Vellidis et al., 1990) 등에서 GPR 조사 기술을 활용함으로써 그 적용의 합리성이 검증되었으며 최근에도 지속적으로 다양한 방법 등의 GPR 실험을 통해서 토양내 함수량과 투수계수 등의 관계를 유도하고 있다. 이와같이 다양한 적용 방법으로 발전되고 있는 GPR 기술을 바탕으로 본 연구에서는 비피압대수층의 동기대와 포화대 내의 함수량 및 지하수면 추정을 위한 기초 실험을 수행하기 위하여 실험용 토조를 제작하여 사질토를 채워서 지하수위의 인위적인 변화에 따른 GPR 반사파 이미지 결과를 해석하였다. 자료의 해석에 앞서 토조 하부에 액주계(piezometer)를 설치하여 획득된 GPR 결과와 비교하여 검증을 하였으며, 검증을 바탕으로 실제 현장에서 적용 가능성 여부를 판단하였다.

2. GPR을 이용한 토양 함수량 측정

GPR 시스템은 넓은 대역폭 전자파 에너지의 짧은 펄스 신호를 송신 안테나로부터 방사시켜 전자기적 물성이 다른 매질에 의해 발생하는 반사, 회절, 감쇠, 분산 등의 파동현상을 수신하여 지질 구조 및 성질에 대한 정보를 제공하는 탐사 장비이다. GPR 탐사의 기본적인 물리적 현상을 이용하여 지하수위 및 함수량 조사에 적용될 경우의 GPR 탐사 개념도는 그림 1과 같다. 여기서 ϵ_r 은 유전상수, v_r 은 전자기파의 전파속도, 그리고 t_r 은 파의 이동시간을 나타내며, 매질의 전기전도도에 따라서 전자기파가 하상에서 반사 혹은 투과되는 양상을 보이고 있다.

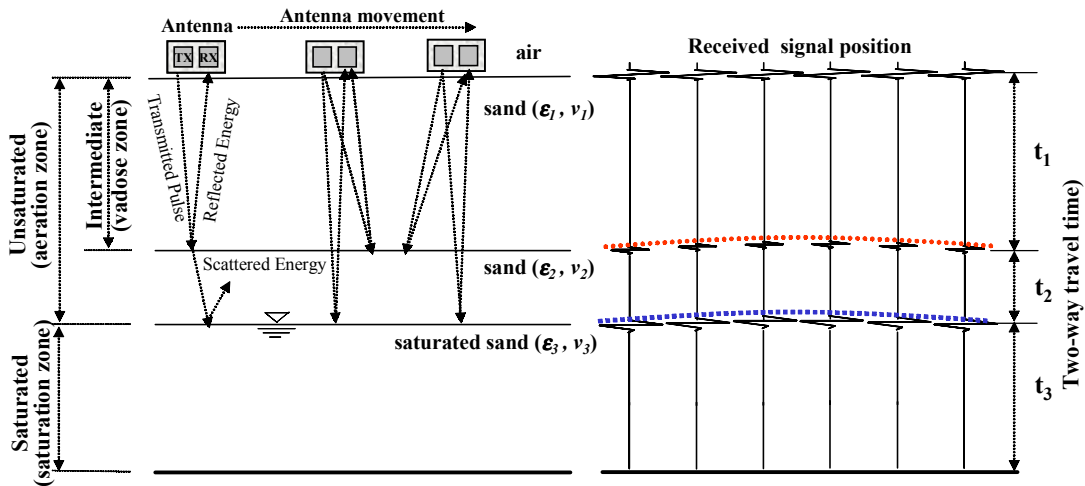


그림 1. GPR 개념도

수신되는 파에 해당하는 매질의 깊이를 알수 있다면 상대유전상수는 식 (1)에 의해서 결정된다. 여기서 ϵ_r 는 매질의 상대유전상수, c 는 자유공간상의 전자기파 전파 속도($3 \times 10^8 \text{ m/ns}$), d 는 반사파가 수신된 깊이를 나타낸다.

$$\epsilon_r = \left(\frac{c}{v}\right)^2 = \left(\frac{ct_r}{2d}\right)^2 \quad (1)$$

기존의 다양한 연구를 통해서 산정된 매질에 따른 전자기파의 전파를 지배하는 전기적 성질인 전기전도도와 유전상수, 파의 이동속도는 그 특성에 따라 <표 1>과 같다(Morey, 1974; Ulriksen, 1982; Annan, 1992).

표 1에 제시된 바와 같이 건조한 모래보다 포화된 모래가 큰 전기전도도와 상대적으로 작은 유전상수를 갖기 때문에 파의 이동시간이 매우 짧아지게 된다.

표 1. 매질에 따른 전기적 특성치

| 매 질 | 전기 전도도($\mu\text{S}/\text{cm}$) ^{a)} | 상대유전상수 | 속도(m/ns) |
|--------------|---|--------|-----------|
| air | 0 | 1 | 0.3 |
| Fresh water | 0.5 | 80 | 0.033 |
| Granite, dry | 0.01 | 5 | 0.13 |
| Sand, dry | 0.01 | 5 | 0.13 |
| Clay, wet | 500 | 10 | 0.095 |
| Soils | | | |
| sandy, dry | 1.4 | 2.6 | 0.19 |
| sandy, wet | 69 | 25 | 0.06 |
| Clayey, dry | 2.7 | 2.5 | 0.19 |
| Clayey, wet | 500 | 19 | 0.07 |

a) $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 단위는 microseimens per centimeter를 의미한다.

전기전도도는 파의 감쇠에 가장 큰 영향을 주는 요소이다. 즉, 식 (2)의 조건에 의해 지층 매질의 전기전도도에 따라서 전자파의 투과 심도가 결정된다. 전기전도도가 크면 클수록 감쇠는 더욱더 많이 발생하고 투과할 수 있는 깊이는 감소하게 된다. 송신안테나로부터 방사되는 에너지 또한 투과 가능 깊이의 중요한 인자이다. 저주파와 안테나의 경우 방출되는 에너지가 고주파에 비해서 상대적으로 크기 때문에 투과할 수 있는 깊이가 고주파 안테나에 비해서 크다. 그러나 안테나의 투과 가능 심도가 깊어 질 경우 해상도는 낮아지는 단점이 있다. 건조한 토양과 포화된 토양의 상대유전상수 차이를 이용하여 식 (2) 및 (3)의 전자파 반사계수 (R)와 전달계수 (T)를 결정하게 된다. 반사계수는 원래 총 에너지에 대한 반사 전자기파 에너지 강도의 비율을 의미하고, 전달계수는 표면으로 되돌아오지 않고 매질 내부로 전달·확산되어 소산되어 버리는 파 에너지의 크기를 나타내는 척도이다. 그러므로 상대적으로 하상 매질의 유전상수 차이가 크면 클수록 매질 탐사에 유리하게 된다(Davis and Annan, 1989). 건조한 토양과 포화된 경우 상대유전상수는 표 1에 제시된 바와 같이 매우 큰 차이가 있으므로 뚜렷한 반사파를 수신할 수 있게된다.

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} \quad (2)$$

$$T = 1 - R = \frac{2\sqrt{\epsilon_{r1}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} \quad (3)$$

여기서 ϵ_{r1} 은 첫 번째 매질의 유전상수이고, ϵ_{r2} 는 두 번째 매질의 유전상수이다.

지하수 및 함수량 조사를 위한 GPR의 적용은 다양한 중심주파수를 이용해서 수행되어질 수 있지만, 일반적으로 높은 주파수는 공간적 해상도를 크게 나타낼 수 있게되나, 심도에 따른 감쇠가 급격히 발생하여 투과심도는 급격히 감소하게 되고, 반대의 경우에는 공간상의 낮은 해상도를 얻게되는 단점이 있다.

4. 실험 조건 및 자료 분석

지하수면 및 함수량 조사를 위한 기초 실험을 수행하기 위해서 실험실 내에 토조를 설치하였다. 토조의 크기는 $1\text{ m} \times 0.8\text{ m} \times 1\text{ m}$ 이며, 토조 내에 모래질 점토를 No. 16 체(입경 1.19 mm)로 체걸름하여 실험에 사용되는 토양의 입경을 조절하였다. 실험용 토양을 토조에 채우면서 일정 양의 물을 공급하여 토양이 포화될 수 있도록 하였고, 수위 분포를 파악하기 위해서 액주계를 토조 하부 네 곳에 설치하였으며, GPR 조사를 실시하기 전에 액주계의 수위를 조사한 후 GPR 조사 결과의 검증을 시도하였다. GPR 조사를 수행하기 위해서 GSSI사에서 개발한 SIR-2000 system을 사용하였고, 중심 안테나 주파수가 400 MHz인 Common MidPoint (CMP) 반사 방법을 이용하였다. 자료 조사 간격은 가로 방향으로 0.25 m 세로방향으로 0.25 m로 일정하게

유지하였다. 획득된 GPR 자료의 해석을 위해서 GSSI사의 Windows RADAN ver2.0을 사용하였다.

토양을 통과하는 GPR 에너지는 토양의 투과율의 변화가 발생할 때 반사된다. 그림 1은 토양 내에 유전율(permittivity)이 상대적으로 차이를 보이는 물질이 존재할 경우 표면에서 레이다 파를 수신할 경우 생기는 GPR 이지의 이상적인 패턴을 보여주고 있다. GPR은 전자기파를 모든 방향으로 방출하기 때문에 상대적으로 유전율의 차이가 크게 나타나는 매질 상부를 이동할 때 바로 그 지점에서 반사가 발생하지 않고 바로 그 직전을 이동할 때 수신되어 일반적으로 쌍곡선(hyperbola)의 형태를 이루게 된다. 토양내의 파의 속도는 쌍곡선 형태의 반사파의 굴곡을 결정하게 된다.

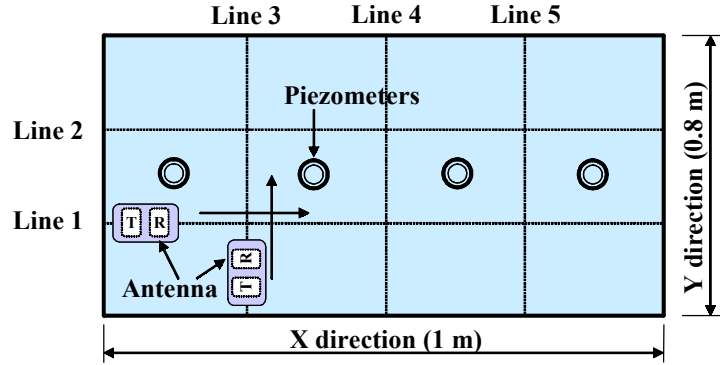


그림 2. GPR 조사를 위한 실험용 토조 평면도

Topp 등(1980)은 토양 내의 전자기파 속도를 측정하는 등 다양한 연구결과를 이용하여 일반적인 형태의 토양 함수량(θ , m^3/m^3)과 상대유전상수(ϵ_r)의 관계를 식 (4)와 같이 제안하였다.

$$\theta = -0.053 + 0.0293\epsilon_r - 0.00055\epsilon_r^2 + 0.0000043\epsilon_r^3 \quad (4)$$

최근에는 토양 함수량과 ϵ_r 과의 관계를 Topp 등(1980)이 제안한 식을 바탕으로 토양 내에 존재하는 각 요소의 체적비와 유전율을 고려하여 다음의 식 (5)와 같은 형태로 제안되었다(Dobson 등, 1985; Roth 등, 1990; Freidman, 1998; Jones와 Friedman, 2000). 토양 내에 존재하는 각 요소(공기, 흙, 물)의 체적 유전율(ϵ_b)을 복합반사지수모형(Complex Refractive Index Model, CRIM)인 식 (5)의 형태로 제시하였다.

$$\epsilon_b = \left\{ (1 - n)\epsilon_{air}^a + \theta\epsilon_{water}^a + (n - \theta)\epsilon_{solid\ phase}^a \right\}^{1/a} \quad (5)$$

여기서 $n(m^3/m^3)$ 은 토양의 공극, ϵ_i 는 매질 i (공기, 물, 그리고 토양의 입자)의 상대유전상수, θ 는 함수량(m^3/m^3), 그리고 a 는 매체에 따른 전기장의 적응력을 설명하는 요소이다(전기장이 토양층에 평행한 경우는 $a=1$, 토양층에 수직인 경우 $a=-1$, 그리고 등방성 매체의 경우에는 $a=0.5$ 를 적용).

$$\theta = \frac{\epsilon_b^a - (1 - n)\epsilon_{soil}^a - n\epsilon_{air}^a}{\epsilon_{water}^a - \epsilon_{air}^a} \quad (6)$$

본 실험 대상 조건에 대하여 토양 내에 존재하는 매질의 유전상수 측정을 위해서 일정 깊이에 대한 파의 이동속도를 분석하여 식 (1)에 대입하면 매질의 유전상수를 추정할 수 있으며 식 (4)와 (6)에 의해서 토양 내에 존재하는 함수량을 산정할 수 있게된다. 여기서 함수량과 유전상수의 변화에 따른 지하수위의 추정을 실시하며 토조의 지하수위를 인위적으로 변화시킴으로서 지하수위와 함수량의 변화를 GPR 조사를 바탕으로 설치된 액주계의 독치와 비교하면서 계측의 정확성을 도모하게된다.

일반적으로 GPR 반사파는 포화대와 비포화대의 경계에서 발생하지 않고 함수량의 변화가 급격한 경사를 나타내는 천이대와 모관수대 경계부분에서 발생하게된다. 이와같은 특성을 활용하여 함수량조사와 연계한 지하수위 예측이 가능하며 일정 심도에 따른 GPR 반사파의 속도를 정확하게 파악하는 것이 중요한 과제이다. 이와같이 GPR 조사의 정확성을 도모하기 위해서 대수층의 반사파 이미지 자료과 더불어 토조의 중심부 네

곳에 액주계(piezometer)를 설치하여 수두강하에 따른 정확한 수위 계측을 실시하였다.

GPR 조사를 위해서 선행되어진 지하수 수위에 대한 반사파의 이동속도를 분석함으로써 평균적인 매질내의 파의 이동속도를 계산할 수 있다. 통기대에 위치한 비포화 점토질 모래에 대한 평균 속도를 산정하고 포화대의 위치에 따른 GPR 반사파의 평균속도를 산정한 후 표 1에 제시된 바와 같이 기존의 실험을 통해 얻어진 매질에 따른 전자기파의 전파속도와 비교하여 적정한 평균속도를 산정할 수 있게된다. 전자기파의 전파속도의 일반적인 실험결과에 비교하여 적정한 전파속도가 결정되면 식 (1)을 이용하여 천이영역을 포함한 통기대와 포화대 내의 유전상수를 계산할 수 있다. 토양 내 각 매질을 통과하는 전자기파의 유전상수를 결정하고 제시된 함수량과 유전상수와의 관계를 이용하여 적용된 실험 조건에 따른 함수량 및 지하수위 예측의 정확성을 검토할 수 있게된다.

5. 결론

지하수 수문학에 있어서 토양수분 및 지하수위의 변화 조사는 매우 중요한 문제이다. 본 연구에서는 포화대의 깊이를 산정하는 연구와 포화대 상부 습윤대의 거동을 조사한 연구 등에 활용된 바 있는 GPR 기술을 바탕으로 비피압대수층의 통기대와 포화대 내의 함수량 및 지하수면 추정을 위한 기초 실험을 수행하였다. 본 연구에서 적용된 GPR 실험은 획득된 이미지의 해석에 다소 어려움이 있지만 토양을 교란시키지 않고 비교적 간편하게 지하수면 및 함수량을 파악하는데 매우 효과적이며, GPR을 이용한 다양한 보완적인 실험이 수행된다면, GPR 기술은 향후 현장의 지질학적 구조가 조사된 지역에서 기존 방법에서 쉽게 판단하기 어려운 공간적인 지하수의 분포 특성을 효율적으로 파악하는데 매우 큰 도움을 줄 수 있을 것이다.

6. 참고문헌

1. Annan A.P. (1992). Ground Penetrating Radar: Workshop Notes. Sensors & Software Inc.: Mississauga, Ontario.
2. Dobson, M.C., Ulaby, F.T., Hallikainen, M.T., and El-Rayes, M.A. (1985). Microwave dielectric behaviour of wet soil-part II: dielectric mixing models. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing GE-23:35-46.
3. Friedman, S.P. (1998). A saturation degree-dependent composite spheres model for describing the effective dielectric constant of unsaturated porous media. Wat. Resour. Res. 34:2949-2961.
4. Jones, S.B., and Friedman, S.P. (2000). Particle shape effect on the effective permittivity of anisotropic or isotropic media consisting of aligned or randomly oriented ellipsoidal particles. Wat. Resour. Res. 36:2821-2833.
5. Iivari, T.A., and Doolittle, J.A. (1994). Computer simulations of depths to water table using ground-penetrating radar in topographically diverse terrains. In Groundwater Quality Management, IAHS Publication 220, ed, K. Kovar and J. Soveri, 11-20. Wallingford: IAHS Press.
6. Roth, K., R., Schulin, H. Flüler, and Attinger, W. (1990). Calibration of time domain reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach. Wat. Resour. Res. 26:2267-2273.
7. Topp, G.C., Davis, J.L., and Annan, A.P. (1980). Soil water content: measurements in coaxial transmission lines. Water Resour. Res. 16, 574-582.
8. Ulriksen, P. (1982). Application of Impulse Radar to Civil Engineering. Department of Engineering Geology, Lund University of Technology: Lund.
9. van Overmeeren, R.A. (1994). Georadar for hydrogeology. First Break 12, no. 8; 410-407
10. van Overmeeren, R.A., Sariowan, S.V., and Gehrels, J.C. (1997). Ground penetrating radar for determining volumetric soil water content; results of comparative measurements at two sites. J. of Hydrol. 197:316-338.
11. Vellidis, G., Smith, M.C., Thomas, D.L., and Asmussen, L.E.(1990). Detecting wetting front movement in a sandy soil with ground-penetrating radar. Transactions of the ASAE 33, no. 6: 1867-1874.