

## 레이다파의 분산성 가이드 현상을 이용한 지하 물성 계산

이명종<sup>1)</sup>, Anthony L. Endres<sup>2)</sup>, 김정호<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> 한국지질자원연구원 지반안전연구부, [muse@kigam.re.kr](mailto:muse@kigam.re.kr)

<sup>2)</sup> Department of Earth Sciences, University of Waterloo, Canada

## Determination of dielectric property of subsurface by dispersive guided GPR wave

Myeong-Jong Yi<sup>1)</sup>, Anthony L. Endres<sup>2)</sup>, Jung-Ho Kim<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Geotechnical Engineering Div., KIGAM

<sup>2)</sup> Department of Earth Sciences, University of Waterloo, Canada

**요약** : 지표수의 토양층 침투에서와 같이 천부 토양층이 하부에 비하여 수분 함유량이 높은 조건하에서 레이다파는 감쇄되지 않고 습윤 토양층을 통하여 가이드 되는 현상을 보이는 경우가 발생한다. 이는 레이다파의 분산성 가이드 현상으로 천부 층의 두께가 레이다파의 파장보다 비슷하거나 작은 경우에 발생한다. 이 연구에서는 FDTD에 의한 수치 모델링을 수행하고 F-K 분석을 통하여 속도분산곡선을 획득함으로써 레이다파의 분산성 가이드 현상을 확인하였다. 이와 같은 가이드 현상은 모드 전파이론으로 설명되며, 이 연구에서는 이를 이용하여 2층 층서구조의 두 층의 유전율과 층의 두께를 정확히 계산할 수 있는 알고리즘을 개발하였다. 이론 모델링 자료에 대한 실험 결과 두층의 유전율과 두께를 정확하게 계산할 수 있었으며, 특히 고차 모드를 포함함으로써 그 정확도를 향상시킬 수 있었다. 향후 비슷한 조건을 가지는 현장에 적용하여 정량적인 전기적 물성을 획득할 수 있을 것으로 기대된다.

**주요어** : 지표레이다, 분산성 가이드, 주파수-파수 분석, 모드 전파,

**Abstract** : When wet soil overlies dry soil, which can be found in the infiltration test, the radar wave is not attenuated and guided within wet soil layer. This phenomenon is known to be the dispersive guided wave and happens when the thickness of upper wet layer is less than or comparable to the wavelength of radar wave. In this study, we have conducted the FDTD modeling and obtained the velocity dispersion curve to identify the dispersive guided wave through F-K analysis. This guided wave can be explained by modal propagation theory and a simple inversion code was developed to obtain the two layer's dielectric constants as well as layer thickness. By inverting the dispersion curve from synthetic modeling data, we could obtain the accurate dielectric constants and layer thickness. Moreover, we could enhance the accuracy by including the higher mode data. We expect this method will be very useful to get the quantitative property of subsurface when the condition is similar.

**Keywords** : GPR, dispersive wave guide, f-k analysis, modal propagation

### 1. 서론

최근 GPR 탐사법은 불포화대(Vadose zone)에서의 수분함량의 파악 및 모니터링에 있어서 중요한 방법의 하나로 인식되고 있으며, 이는 불포화대를 이루는 토양(4~10), 물(80), 그리고 공기(1) 등의 유전율 차이가 뚜렷하여 레이더파의 전파속도가 수분함량에 크게 의존하게 되기 때문이다(Topp et al., 1980). GPR 탐사에 의한 토양 수분함량 측정에는 반사법과 CMP(common midpoint) 또는 WARR(wide angle reflection and refraction)법 등이 이용되며, 후자의 경우에는 주로 천부에서의 지중 직접파(Direct Ground Wave)를 이용하여 레이더파의 속도를 구하고 이를 Topp의 방정식(Topp et al., 1980) 등을 이용하여 토양의 수분함량으로 변환하게 된다. 이와 같은 방법에서의 문제점 중의 하나는 천부층이 매우 얇은 경우 발생하는 여러가지 파들을 분리하기 어렵고 그 결과 겹보기 수평속도를 획득하는데 어려움을 겪는다는 점이다(Galagedara et al., 2005, Huisman et al., 2001). 특히, 얇은 천부 토양층의 수분함량이 하부에 비하여 높은 경우에는 매우 특별한 현상이 발생하는 바, 이를 레이더파의 분산성 가이드 현상(Arcone et al., 2003)이라고 부르며, 본 연구에서는 지하수 조건이 습윤-건조토양의 순서로 된 토양조건하에서 정확하게 두 토양층의 전기적 특성을 측정하는 방법을 개발하고자 하였다.

### 2. 습윤-건조 토양에 대한 수치모델링

지하수의 거동에 대한 연구에 있어서 물의 지표로부터의 침투현상을 규명하는 것은 지표수-지하수 연계해석에 있어서 매우 중요한 문제의 하나이다. 이 연구에서는 이와 같은 점을 상정하여 시간영역 유한차분(FDTD; Finite Difference Time Domain) 모델링을 수행하였다(Giannopolous, 2002). Fig. 1은 설정한 지하구조 모형으로 2층 층서구조를 가정하였다. 이 모형에서 공기층의 두께는 18 m 로 하여 인위적인 반사가 없도록 하였으며, 지하하부를 22 m X 7 m 로 하였다. 또한, 송신 안테나를 10 m에 위치하고 수신 안테나를 10.5 m에서 22.48 m 까지 2 cm 간격으로 이동시킴으로써 WARR자료를 획득하였다. 수치모델링에서 문제가 되는 수치분산을 최소화하고자 격자의 크기를 0.005m로 하고 11.328 psec의 시간 간격을 이용하여 모델링을 수행하였다. 본 모델링에서는 리커 파형요소를 송신원으로 이용하였다.

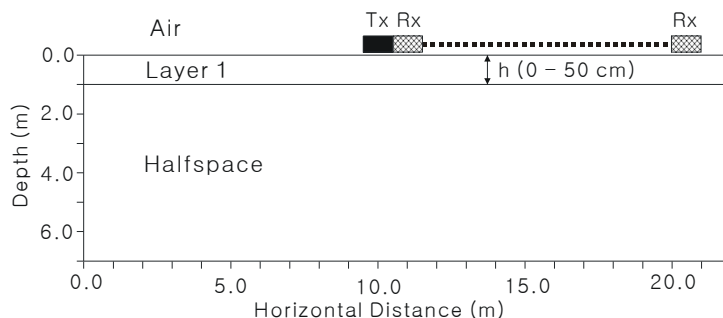
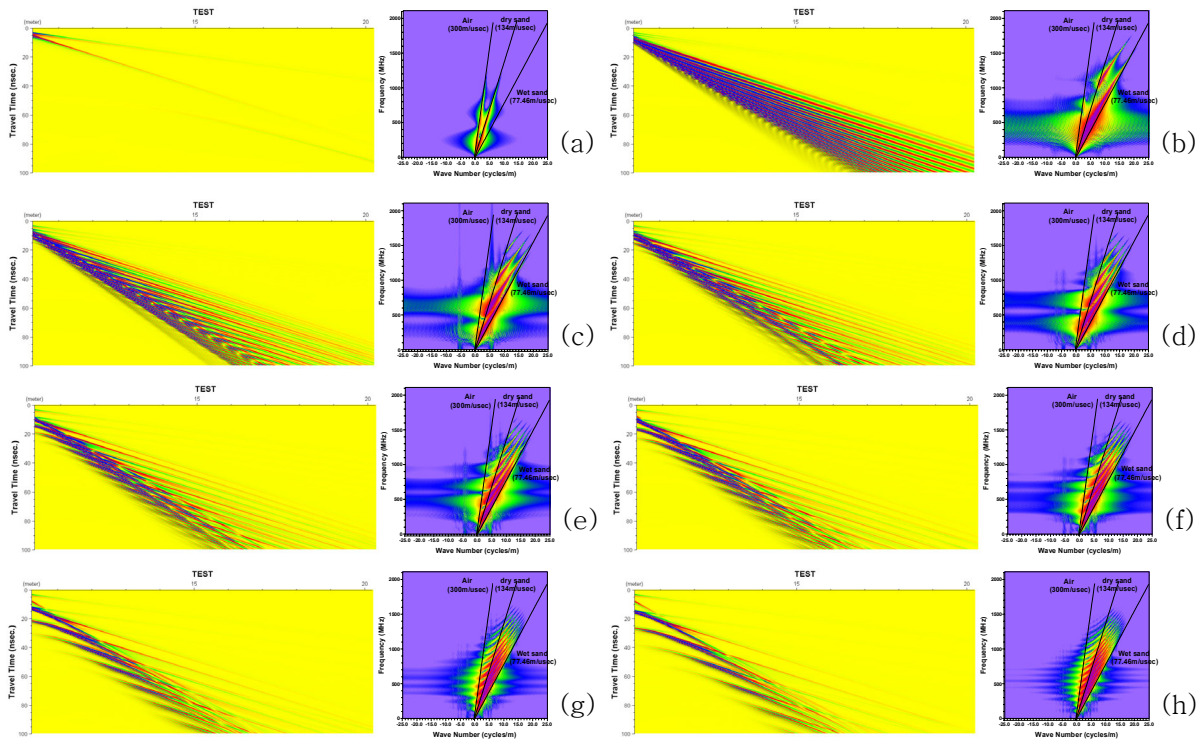


Fig. 1. Sketch of two-layered earth model for the numerical analysis in this study.

Fig. 2는 Fig. 1의 모형에 대하여 천부에 습윤상태의 토양이 존재하는 경우에 대하여 FDTD 모델링을 수행한 결과를 나타낸다. 여기서 상부 습윤 상태 사질토양의 상대유전율은 15, 하부 건조토양의 유전율은 5로 설정하였다(Galagedara, 2005). 그림에서의 모델링에 사용된 중심주파수는 450 MHz이고 경계면의 깊이는 0 cm에서 45 cm 까지 변화

하고 있다. 이와 같은 레이다 영상에 대하여 각 그림의 우측에는 그 2차원 푸리에 변환을 통한 F-K 분석결과를 보여주고 있다.

그림에서 경계면이 없는 경우 공중파 (300m/usec) 및 지중 직접파 (134m/usec)가 뚜렷하게 측정되며, 침윤선이 5 cm 에 형성되는 경우 매우 특징적인 반응으로서 레이다파가 감쇠되지 않고 저주파수 성분이 고주파수 성분에 비하여 빨리 도착하는 현상을 보여주고 있다. 이와 같은 특별한 현상은 분산성 가이드파라고 부르며 이는 레이다파가 상부의 공기층과 하부의 건조층에 의하여 가이드되기 때문에 발생하는 현상이다. 이와 같은 가이드파의 특성은 F-K 스펙트럼 상에서 관찰할 수 있으며, 이는 그라운드 파의 속도가 주파수에 대한 의존성을 보인다는 점에 있다. 저주파수대역에서의 속도는 건조층의 속도에 가깝게 나타나며, 고주파수 영역에서는 습윤토양의 속도에 가까운 속도를 보여주고 있다. 심도가 증가함에 따라 그림에는 닭벼슬 형태의 스펙트럼 분포를 보이고 있으며, 이들은 건조 토양 및 습윤토양의 속도로 이루어지는 부채살 영역내에 분포하고 있다. 또한 경계면 심도가 증가함에 따라 F-K 스펙트럼 상에서 각 파를 구분하기가 점점 어려워지고 있다.



**Fig. 2** Synthetic WARR data for the wet over dry sand model with the change of depth of interface and their  $f-k$  spectra. Depths to the interface are (a) 0 cm, (b) 5 cm, (c) 10 cm, (d) 15 cm, (e) 20 cm, (f) 25 cm, (g) 35 cm, and (h) 45 cm, respectively.

### 3. 분산성 가이드파의 역산

Fig. 2에서와 같이 습윤 상태의 토양 하부에 상대적으로 건조한 토양이 존재하는 경우, 레이다파의 속도는 주파수에 대한 의존성을 보이며 레이다파가 공기층과 하부 건조층에 의하여 가이드되고 있다. 이와 같은 레이다파의 가이드 현상은 모드 전파 이론(Modal Propagation theory)에 의하여 설명할 수 있으며, 이와 같은 모드 전파는 비손실성 전파로서 층의 두께가 레이다파의 파장보다 비슷하거나 작은 경우에 발생한다(Arcone et.

al., 2003). Fig. 1과 같은 2층 층서구조의 경우 상부층의 유전율이 하부층 보다 큰 경우에 발생하며, 이는 습윤 토양이 건조층을 덮고 있는 경우에 해당한다. 모드 전파이론에 의하면 층의 두께와 유전율 대비에 따라 임계각 이상의 특정한 입사각들에서 발생하는 고차 모드가 발생하게 되며, 이중 가장 낮은 차수의 모드가 가장 큰 에너지를 가지게 된다. 이와 같은 분산성 가이드파의 발생은 모드 전파 이론으로 설명할 수 있으며, TE (Transverse Electric) 모드의 경우 다음과 같은 모드 방정식을 쓸 수 있고

$$R_{10}R_{12} \exp(i2k_1d \cos \theta) = 1, \quad (3)$$

여기서, 두 TE 모드 반사계수는 다음과 같다.

$$R_{10} = \frac{k_1 \cos \theta - (k_0^2 - k_1^2 \sin^2 \theta)^{1/2}}{k_1 \cos \theta + (k_0^2 - k_1^2 \sin^2 \theta)^{1/2}} \quad (4)$$

$$R_{12} = \frac{k_1 \cos \theta - (k_2^2 - k_1^2 \sin^2 \theta)^{1/2}}{k_1 \cos \theta + (k_2^2 - k_1^2 \sin^2 \theta)^{1/2}} \quad (5)$$

여기서,  $k_0 = \frac{2\pi f}{c}$ ,  $k_1 = k_0 \sqrt{\epsilon_1}$ ,  $k_2 = k_0 \sqrt{\epsilon_2}$  이다. 또한 상부층의 유전율은  $\epsilon_1$  그 두께는  $h$  이고 하부층의 유전율은  $\epsilon_2$ 이며 ( $\epsilon_1 > \epsilon_2$ ), 식 (3)을 입사각  $\theta$ 에 대해서 풀면 위상속도는 다음과 같다.

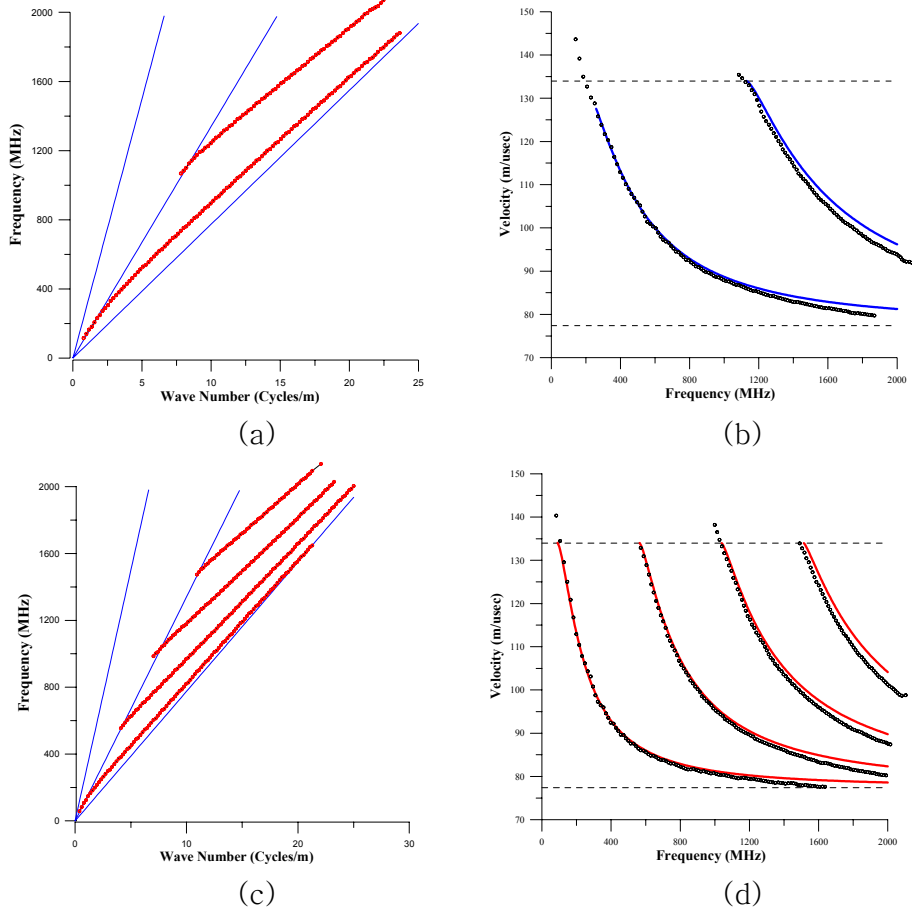
$$v_{ph} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_1} \sin \theta}. \quad (6)$$

이와 같은 레이다파의 속도분산을 가시화하기 위하여 F-K 스펙트럼 상에 나타나는 이벤트를 발췌하였으며, Fig. 3 (a)와 (c)는 경계면 심도가 5cm 및 10cm 인 경우의 F-K 스펙트럼에서 발췌한 자료를 나타낸다. 이와 같은 자료의 발췌에는 각 모드에 대하여 F-K 스펙트럼 상의 최대값을 나타내는 부분을 이용하였다. 경계면 심도가 5cm인 경우 1차 및 2차 모드를, 심도가 10cm인 경우에는 1차~4차 모드까지 발췌하였다. 이와 같이 발췌된 자료는 손쉽게 속도-주파수 영역인 속도 스펙트럼으로 변환할 수 있으며, 그림에서 (b)와 (d)는 그 결과를 나타낸다. 그림에는 해석적으로 계산된 각 모드에 대한 속도 스펙트럼을 푸른색으로 표시하였다. 이 연구에서 획득한 탐사자료가 유한차분 모델링에 의한 모델링 자료이므로 그림에서와 같이 특히 고주파수대역에서 해석적 해와의 차이가 발생하고 있는데 이는 수치모델링의 수치분산에 의한 효과로서 더욱 작은 격자를 이용함으로써 그 분산효과를 줄일 수 있다. 이와 같은 오차를 제외하고 이론해와 F-K 스펙트럼을 이용하여 발췌한 자료가 아주 잘 일치하고 있으며, 이는 각 모드의 위상속도를 얻기 위하여 F-K 스펙트럼을 이용하는 방법이 효율적임을 잘 보여주고 있다.

여기서 또 한가지 주목해야 할 점은 특정한 절단 주파수 아래에는 분산 곡선이 존재하지 않는다는 점으로 이는 레이다파의 가이드 현상이 일종의 고주파 통과필터로 작용함을 말해준다. 1층의 두께가 5cm인 경우 1차 모드에 대한 절단 주파수는 약 180MHz임에 비하여 2차 모드의 절단 주파수는 1130MHz로 나타나 있다. 또한, 1층 두께가 10cm인 경우 절단주파수가 1차 모드의 경우 90 MHz, 2차 모드의 경우 565MHz로 절단 주파수가 낮아지는 현상을 보여주고 있다. 이와 같은 고주파 통과 필터 특성은 분산성 가이드파의 또 하나의 중요한 특성의 하나로 판단된다.

이와 같은 분산특성에 대한 고찰과 아울러 본 연구에서는 이를 이용하여, 2층 층서구조의 두 층의 유전율과 1층 두께를 정확히 계산해내는 역산 알고리즘을 개발하였다. 이는

전통적인 곡선적합법(curve-matching method)으로써 최근에 이에 관한 연구로서 L1 노음을 최소화하는 역산법에 대한 연구결과가 발표된바 있다(van der Kruk et al., 2006). 이 연구에서는 1층의 유전율과 두께, 2층의 유전율을 모델변수로 취하였으며, 식 (1)의 모드 방정식을 이용하여 최소자승 역산 알고리즘을 구성하였다. 최소자승 역산에는 역산의 안정화를 위하여 Marquardt-Levenberg 법을 이용하였다. 실제 역산의 수행 시에는 초기치 설정이 중요한 경우가 많으며, 이 연구에서는 초기값을 속도 분산 곡선 자체를 이용하였다. 즉, 상부층의 유전율에 대해서는 최고 주파수에 대한 속도를 이용하였고 하부층에 대해서는 최저 주파수에 대한 속도를 이용하였다. 또한, 상부층의 두께는 분산곡선 상의 중간 주파수에 대한 파장의 절반으로 설정하였다.



**Fig. 3** Maximum amplitude trends from  $f$ - $k$ spectra ((a) and (c)) and velocity dispersion curves for the wet over dry layer with wet layer thickness of 5 cm (b) and 10 cm (d), respectively.

Fig. 3의 분산곡선에 대하여 수행한 역산 실험은 두가지의 입력자료를 이용하여 수행되었다. 즉, 1차 모드 자료만을 이용하는 경우와 2차 모드까지 포함하는 경우에 대하여 역산을 수행하였으며, 역산수행의 결과는 Table 1에 정리하였다. 1차 모드만을 이용하는 경우, 상부층의 두께 및 유전율은 참값에 약간의 차이를 보이나 하부층의 유전율은 매우 정확한 값을 보이고 있다. 2차 모드를 포함한 경우 상부층의 두께가 매우 정확해 졌으며, 이에 비하여 두층의 유전율은 약간의 차이를 보이고 있다. 이를 볼 때 2차 모드를 포함함으로써 상부층의 두께와 유전율 결정에 좀 더 정확한 결과를 획득할 수 있음을 알 수 있다. 상부층 두께가 10cm 인 경우에 있어서도 5 cm 두께의 경우와 마찬가지로 2차 모

드를 포함함으로써 상부층의 두께와 유전율을 좀 더 정확하게 구할 수 있음을 알 수 있다. 이상으로부터 분산성 가이드파의 역산을 통하여 실제 하부의 전기적 물성을 정확히 획득할 수 있으며, 고차 모드의 포함을 통하여 그 정확도를 높일 수 있음을 알 수 있다.

**Table 1** Inversion results from 4 kinds of experiments.

Model	Inversion Experiment	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$h(\text{cm})$
$h = 5 \text{ cm}$	1 <sup>st</sup> mode only	15.78294	5.106634	4.519706
	1 <sup>st</sup> + 2 <sup>nd</sup> mode	15.35429	4.676033	5.042217
$h = 10 \text{ cm}$	1 <sup>st</sup> mode only	15.44406	4.893042	9.384015
	1 <sup>st</sup> + 2 <sup>nd</sup> mode	15.37233	4.665123	9.879493

#### 4. 결 론

이 연구에서는 불포화대에서의 지표수의 침투현상을 정량적으로 이해하기 위하여 FDTD 모델링을 수행하고 이에 대하여 F-K 분석을 실시하였으며, 이와 같이 습윤토양이 건조 토양을 덮고 있는 경우 특징적으로 레이다파의 속도가 주파수에 의존하는 레이다파의 분산성 가이드 현상이 발생함을 확인하였다. 이와 같은 분산성 가이드 현상은 모드 전파이론으로 설명되며, 이를 이용하여 2층 층서구조에서 두층의 유전율과 층의 두께를 정확하게 계산할 수 있는 알고리즘을 개발하였다. 향후 이와 같은 속도 분산을 이용한 전기적 물성 측정은 그 전기적 특성이 유사한 여러 현장에 이용하여 탁월한 성과를 제공할 것으로 기대된다.

#### 참고문헌

- Arcone, S. A., Peapples, P. R., and Liu, L., 2003, Propagation of a ground-penetrating radar (GPR) pulse in a thin-surface waveguide, *Geophysics*, v. 68, pp.1922-1933.
- Galagedara, L. W., Redman, J. D., Parkin, G. W., Annan, A. P., and Endres, A. L.: Numerical modeling of GPR to determine the direct ground wave sampling depth in estimating soil moisture content, *Vadose Zone Journal*, v. 4, pp. 1096-1106, 2005.
- Giannopolous, A. 2002. Electromagnetic simulator for ground probing radar: GPRMAX2D V 1.5 User' s manual. University of Edinburgh, Scotland.
- Huisman, J.A., Sperl, C., Bouten, W., and Verstraten, J.M. 2001. Soil water content measurements at different scales: Accuracy of time domain reflectometry and ground penetrating radar. *Journal of Hydrology* **245**: 48-58.
- Topp, G. C., Davis, J. L., and Annan, A. P. 1980. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*, **16**(3): 574-582.
- van der Kruk, J., Streich, R., and Green, A. G., 2006, Properties of surface waveguides derived from separate and joint inversion of dispersive TE and TM GPR data, *Geophysics*, v. 71, p. K19-K29.