

지반의 불균질성이 GPR탐사 신호에 미치는 영향에 대한 수치해석적 분석

The Effect of Ground Heterogeneity on the GPR Signal: Numerical Analysis

이상연¹⁾ · 송기일[†] · 류희환²⁾ · 강경남³⁾

Sangyun Lee · Ki-il Song · Heehwan Ryu · Kyungnam Kang

Received: June 29th, 2022; Revised: June 30th, 2022; Accepted: July 13th, 2022

ABSTRACT : The importance of subsurface information is becoming crucial in urban area due to increase of underground construction. The position of underground facilities should be identified precisely before excavation work. Geophysical exploration method such as ground penetration radar (GPR) can be useful to investigate the subsurface facilities. GPR transmits electromagnetic waves to the ground and analyzes the reflected signals to determine the location and depth of subsurface facilities. Unfortunately, the readability of GPR signal is not favorable. To overcome this deficiency and automate the GPR signal processing, deep learning technique has been introduced recently. The accuracy of deep learning model can be improved with abundant training data. The ground is inherently heterogeneous and the spacially variable ground properties can affect on the GPR signal. However, the effect of ground heterogeneity on the GPR signal has yet to be fully investigated. In this study, ground heterogeneity is simulated based on the fractal theory and GPR simulation is carried out by using gprMax. It is found that as the fractal dimension increases exceed 2.0, the error of fitting parameter reduces significantly. And the range of water content should be less than 0.14 to secure the validity of analysis.

Keywords : Ground penetrating radar (GPR), Finite-difference time-domain (FDTD), Fractal, Numerical analysis

요지 : 최근 지하공간에 대한 개발이 활발히 진행됨에 따라 지중 시설물의 정보에 대한 중요도가 증가하고 있다. 굴착작업을 수행하기 전에 지중 시설물의 위치를 정확히 파악해야 한다. 지표투과레이더(GPR)와 같은 지구물리적 탐사 방법은 지중 시설물을 조사하는데 유용하게 사용된다. GPR은 지반에 전자기파를 송출하며 지반과 다른 매질에 의해 반사되는 신호를 분석하여 지중시설물의 위치와 깊이 등을 파악한다. 그러나 GPR 데이터의 판독은 숙련된 전문가의 주관적 판단에 의존하기 때문에 이를 딥러닝을 통해 자동화하려는 많은 연구가 진행되고 있다. 딥러닝은 학습 데이터가 많을수록 정확한 모델을 만들 수 있으며, 이러한 학습데이터 축적에 있어 수치해석이 좋은 대안이 될 수 있다. 수치해석의 경우 지반의 불균질성을 모사하여 다양한 조건에서의 GPR 탐사 데이터를 생성할 수 있으며, 이를 이용하여 학습모델의 성능을 향상시킬 수 있을 것으로 생각된다. 지반은 불균질하며, GPR 신호는 지반의 다양한 변수로 인해 영향을 받는다. 그러나 이러한 불균질 지반에 대한 연구가 필요한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 프랙탈 차원수와 지반의 함수비 범위에 따른 GPR탐사 신호특성을 분석하고 불균질한 지반을 모사하기 위한 입력파라미터에 대한 연구를 수행하였다. 프랙탈 차원수가 2.0을 넘어가면 적합곡선에 대한 오차가 크게 감소하는 것으로 나타났다. 그리고 분석의 타당성을 확보하기 위해 함수비의 범위가 0.14 미만이어야 한다.

주요어 : 지표투과레이더(GPR), 시간영역 유한차분법(FDTD), 프랙탈, 수치해석

1. 서론

최근 지하공간에 대한 개발이 활발히 진행됨에 따라 지중 시설물의 정보에 대한 중요도가 증가하고 있다. 지중시설물은 넓은 공간에 위치하기 때문에 비파괴 검사를 통해 지중 시설물의 위치정보를 획득하며, 주로 지표투과레이더(Ground Penetration Radar, GPR) 탐사와 전기비저항 탐사를 사용한다. 지하시설물의 경우 지표면으로부터 0~5m 깊이에 매설되는 경우가 많으며, 이러한 깊이에서 GPR 탐사를 통해

지하시설물의 위치를 파악할 수 있다.

GPR 탐사는 전자기파 신호를 광대역 안테나를 통해 지하로 송신하고, 되돌아온 신호를 수신 및 분석하여 지하표적의 위치, 모양, 구성성분 등에 대한 정보를 알아내는 방법이다(Hyun, 2017). 또한 GPR 탐사의 경우 대상 지하시설물의 재질과 무관하게 탐사할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 Chae et al.(2019)에 따르면 다양한 지하물체가 지하 배관과 같은 유사한 반사신호를 만들기 때문에 GPR 데이터의 판독은 숙련된 전문가의 주관적 판단에 좌우되며, 복잡한 지형,

1) Ph. D. Student, Department of Civil Engineering, Inha University

2) Principal Researcher, Structural & Seismic Technology Group, KEPRI

3) Ph. D., Research Institute of Construction & Environmental System, Inha University

† Professor, Department of Civil Engineering, inha University (Corresponding Author : ksong@inha.ac.kr)

지하수 등으로 인해 신호의 판독이 어렵다.

이러한 문제를 해결하기 위해 딥러닝을 이용하여 학습모델을 생성하고 이를 이용하여 지중시설물을 자동으로 판독하는 기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 딥러닝을 이용한 연구 대부분이 이미지 학습을 통한 지도학습으로 진행되고 있다(Chae et al., 2019; Pham & Lefèvre, 2018; Zhou et al., 2018). 지도학습에서 학습 데이터의 양과 질은 학습모델의 성능을 좌우하기 때문에 많은 질 좋은 데이터를 확보하는 것이 중요하다. 이러한 학습 데이터의 축적에 있어 수치해석은 다양한 재질의 지반에서 다양한 크기, 위치에 따른 데이터를 확보할 수 있어 좋은 대안이 될 수 있다.

GPR 탐사에서 사용하는 지반의 특성은 유전율, 투자율과 같은 특성으로 일반적인 지반조사를 통해 확인이 어려운 인자들이다. Peplinski et al.(1995)는 지반의 모래, 점토의 단위중량 및 구성비 등과 유전율 및 투자율 등의 관계식을 통해 지반의 전자기적 성질을 파악할 수 있는 연구를 수행한 바 있다. Giannakis(2016)는 프랙탈(fractal) 기법을 사용하여 실제 지반과 같은 비 균질성 특성을 구현하여 수치해석을 진행하고 이를 지뢰탐사를 위한 GPR 탐사 해석에 적용한 바 있다. 해당 논문에서는 지표면의 식생, 지하수위 및 물 웅덩이 등을 모사하여 지뢰탐사를 위한 수치해석적 연구를 수행하였다. 그러나 GPR 탐사를 수치해석적으로 분석하기 위한 연구는 상대적으로 부족하며, 특히, 지반의 불균질성이 GPR 신호에 미치는 영향에 대한 연구는 아직 부족한 실정이다. 본 연구에서는 프랙탈 기법을 이용하여 불균질한 지반모델을 구축하고 GPR 탐사 해석을 수행하였다. 이를 통해 불균질한 지반이 GPR 신호 특성에 미치는 영향에 대하여 분석하였다.

2. GPR의 기본 원리

GPR은 전자기파의 전파(propagation)와 반사(reflection)의 성질을 이용하여 지중의 각종 현상을 밝혀내는 최신 물리탐사(geophysical survey) 기술이다(Chae et al., 2019). GPR의 탐사원리는 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다. 전자기파를 특정 매질 속으로 송신하여 다른 전기적 성질을 갖는 물체의 표면에서 전자기파가 반사되게 되며, 이런 반사파를 수신하여 반사된 에너지와 반사파의 도달 시간을 기록하여 반사가 발생한 위치 및 심도 등의 정보를 얻을 수 있다(Kim et al., 2008).

GPR 데이터는 유형에 따라 A-scan, B-scan, C-scan으로 구분할 수 있으며, Fig. 2에 각각의 데이터 유형을 도시하였다. A-scan의 경우 시간영역에 대한 정보를 제공하며, B-scan의 경우 탐사를 수행한 경로에 따라 A-scan 데이터를 나열

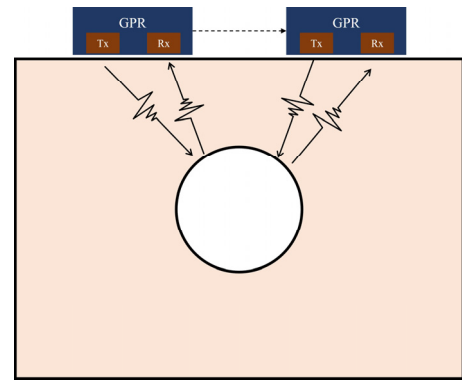
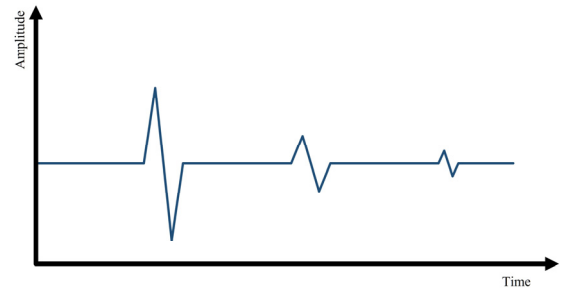
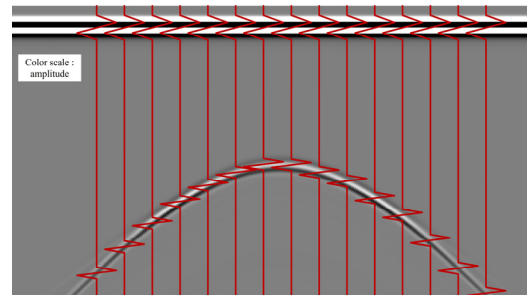


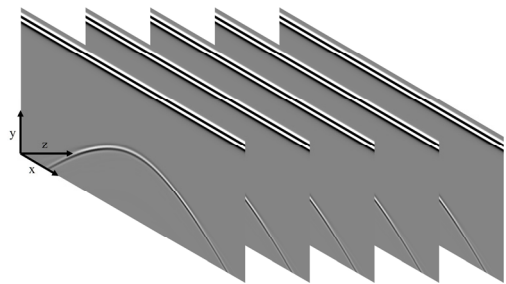
Fig. 1. Principle of ground penetrating radar



(a)



(b)



(c)

Fig. 2. GPR data form, (a) A-scan, (b) B-scan, (c) C-scan

하여 2차원 데이터로 형성한 것이다. C-scan의 경우 B-scan 데이터를 공간에 배열하여 공간에 대한 탐사 데이터를 의미한다.

A-scan 데이터에서 신호가 송신된 시간과 반사파가 수신된 시간의 차이와 매질의 유전율을 통해 대상물체의 심도를 계산할 수 있다. 이때 매질의 유전율을 통해 매질 내에서의 전자파의 속도를 계산하여야 한다. 전자파의 속도는

Eq. (1)과 같은 식을 통해 계산할 수 있다.

$$V = \frac{c}{\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (1)$$

여기서, V 는 매질내에서 파의 속도(m/sec), c 는 빛의 속도(m/sec), μ 와 ϵ 는 무차원 계수로 각각 상대 투자율, 상대 유전율을 의미한다.

강자성체를 제외한 일반적인 매질의 상대 투자율은 거의 1에 가깝지만, 상대 유전율은 1~80까지 매우 다양하기 때문에 매질의 유전율이 속도에 가장 영향을 많이 끼친다(Kim et al., 2008). 따라서 매질 내에서 전자파의 속도는 Eq. (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V \approx \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2)$$

3. gprMax를 이용한 수치해석

3.1 FDTD 수치해석

시간영역 유한차분법(Finite Difference Time Domain, FDTD)은 해석을 수행하고자 하는 모델을 유한한 개수의 Yee 셀로 이산화하여 맥스웰 방정식을 풀어내는 것으로 해석이 진행된다.

Fig. 3과 같은 Yee cell은 시간 및 공간 모두 이산화 되어 각 FDTD 셀에 적용되며, 미소시간영역에 대한 해석을 반복하여 FDTD 솔버가 주어진 시간 영역에 대한 해석을 진행한다.

미소시간을 결정하기 위한 안정조건은 Courant, Freidrichs, Lewy의 이니셜을 딴 CFL 조건으로 알려져 있으며 Eq. (3)과 같이 주어진다.

$$\Delta t \leq \frac{1}{c \sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} + \frac{1}{(\Delta z)^2}}} \quad (3)$$

여기서, c 는 광속(m/sec)을 의미하며, Δx , Δy , Δz 는 유한요소(단일 셀)의 x , y , z 축 길이를 의미한다. Δt 는 해석을 수행하는 미소시간을 의미하며, 단일 셀의 x , y , z 축 길이로 결정된다. 2차원 해석에 대한 안정조건은 $\Delta z \rightarrow \infty$ 로 두어 계산한다(Giannopoulos, 2005).

FDTD 수치해석에서 공간을 이산화하는 방법은 필요한 정확도, 송신 신호의 주파수, 목표 대상의 크기 등에 따라 변화되어야 한다. 또한 현실의 경우 전자기파가 방향과 주파수에 관계없이 동일한 속도로 전파되나 수치해석을 위해 이산화된 환경에서는 그와 같이 전달되지 않는다. 이러한 오차를 최소화하기 위해서는 Eq. (4)와 같은 조건을 만족하여 해석 모델을 구성하는 것이 바람직하다고 알려져 있다(Giannopoulos, 1998).

$$\Delta l = \frac{\lambda}{10} \quad (4)$$

여기서, Δl 은 이산화되는 셀의 길이이며, λ 는 해석영역에서 가장 작은 파장의 길이를 의미한다. 따라서 파가 진행하는 영역에서 한 셀의 길이는 해석영역의 최소 파장의 길이보다 적어도 10배 이상 작도록 해석 모델을 구성해야 한다(Giannopoulos, 2005).

해석 대상 지반을 모델링할 시, 지반의 불균질성을 고려하기 위해 프랙탈 기법을 도입하여 해석모델을 구성하였다. 프랙탈은 자기 유사성을 갖는 기하학적 구조를 의미한다. Mandelbrot(1967)는 프랙탈 기법을 통해 실제 지형과 유사한 합성 지형을 생성한 연구를 수행했었으며, Giannakis et al.(2015)는 지반의 거친 표면과 지반의 확률론적 특성을 모사하기 위해 프랙탈 기법을 사용하여 지반모델을 형성하고 FDTD 수치해석을 진행한 바 있다.

3.2 gprMax 수치해석

단일 유전율 지반 모델과 프랙탈 기법을 통한 불균질 지반 모델의 신호특성을 분석하기 위해 동일한 모델에서 지반의 물성을 변경하며 해석을 진행하였다. 수치해석 프로그램으로는 오픈소스 프로그램인 gprMax를 사용하여 해석을 수행하였으며, 지반모델은 Peplinski et al.(1995)이 제안한 지반 물성 모델을 사용하여 불균질 지반의 물성을 결정하였다. 해당모델은 Dobson et al.(1985)이 제안했던 지반의 전기적 특성을 구하는 모델에서 적용범위를 0.3GHz~1.3GHz의 주파수 범위에서 적용 가능하도록 제안한 모델이다. 해당

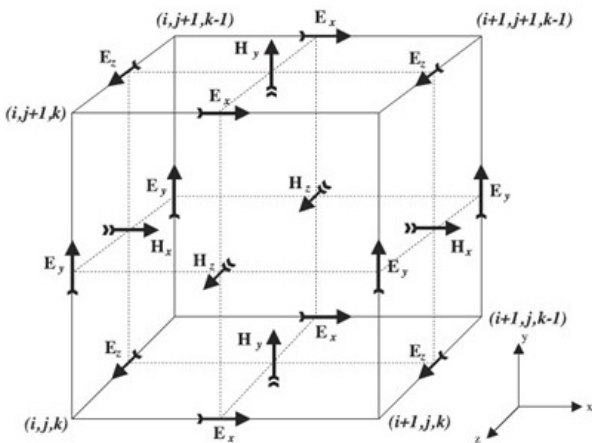


Fig. 3. FDTD Yee cell (Warren et al., 2016)

모델의 입력 변수로는 사질토의 비율과 지반의 단위중량, 함수비 등을 입력변수로 지반의 유전율을 결정한다.

gprMax에서는 함수비를 범위 형태로 설정하고 프랙탈에 사용될 특성의 개수를 설정한다. 설정된 개수에 따라 함수비가 분포되며 이를 통해 지반 유전율 특성을 계산하여 입력 물성을 결정한다. Eq. (5)는 Dobson et al.(1985)가 제안했던 유전율 추정식이며, 이를 이용하여 Peplinski et al. (1995)가 Eq. (6)을 제안하였다. Eq. (7)~(10)은 Eq. (5)에 사용되는 변수를 계산하기 위한 수식이다.

$$\epsilon'_{(1.4-1.8GHz)} = \epsilon_0 \left(1 + \frac{\rho_b}{\rho_s} (\epsilon_s^a - 1) + m_u^{\beta'} \epsilon_w'^a - m_u \right)^{1/a} \quad (5)$$

$$\epsilon'_{(0.3-1.3GHz)} = 1.15 \epsilon'_{(1.4-1.8GHz)} - 0.68 \quad (6)$$

$$\epsilon'' = \epsilon_0 m_u^a \left(\frac{\sigma_f}{\omega \epsilon_0} \frac{(\rho_s - \rho_b)}{\rho_s m_u} - \epsilon_w'' \right) \quad (7)$$

$$\epsilon_s = (1.01 + 0.44 \rho_s)^2 - 0.062 \quad (8)$$

$$\beta' = 1.2748 - 0.519S - 0.152C \quad (9)$$

$$\beta'' = 1.33797 - 0.603S - 0.166C \quad (10)$$

상기 식에서 ϵ' 는 재료 유전율의 실수부를 의미하며, ϵ'' 는 허수부를 의미한다. ϵ_0 는 진공상태의 유전율, ρ_s , ρ_b 는 흙입자의 밀도와 체적밀도, ϵ_s 는 모래입자의 상대유전율, m_u 는 함수비, ϵ_w 는 물의 유전율, $a = 0.65$, S 는 모래 함유율,

Table 1. Input parameter for gprMax analysis

Δl (m)		0.003
t_w (ns)		110
Soil	S	0.5
	C	0.5
	ρ_s (g/cm ³)	2
	ρ_b (g/cm ³)	2.66
m_u		0.15~0.2
Waveform	Type	Ricker
	f (MHz)	300

C 는 점토 함유율을 의미한다. 본 연구에서는 상기 식을 통해 형성된 프랙탈 모델의 차원수 및 지반 함수비에 따른 수신신호 특성을 분석하였다. 수치해석의 모델은 폭 10m, 높이 4m의 지반모델을 생성했으며, 관로 모델은 가로 5m, 깊이 2m 위치에 직경 1.5m로 형성하였다. 송신신호의 파형은 리커(ricker)파형, 송신 주파수는 300MHz를 사용하였다. 또한 지반모델의 입력 물성은 Peplinski et al.(1995)의 입력물성을 사용했으며, 함수비만 0.15~0.2로 수정하여 적용하였다. 적용된 입력물성은 Table 1에 정리하였다.

3.3 프랙탈 차원수에 따른 반시신호 특성

프랙탈 차원수는 0.5를 시작으로 0.5씩 증가시켜 3.5까지 해석을 진행하였다. Fig. 4는 차원수에 따른 해석모델의 일부이다.

Fig. 4의 수치해석 결과는 Fig. 5에 도시하였다. B-scan 데이터로 나타낸 결과, 차원수가 증가함에 따라 단일 유전율

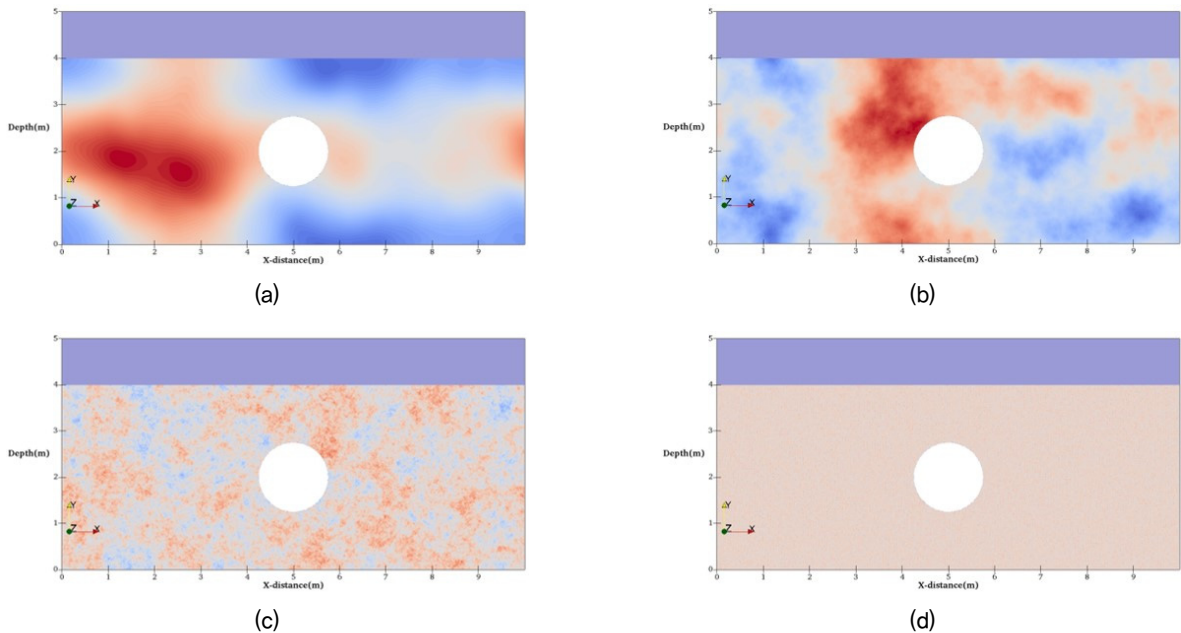


Fig. 4. Analysis model about fractal dimension (a) 0.5, (b) 1.5, (c) 2.5, (d) 3.5

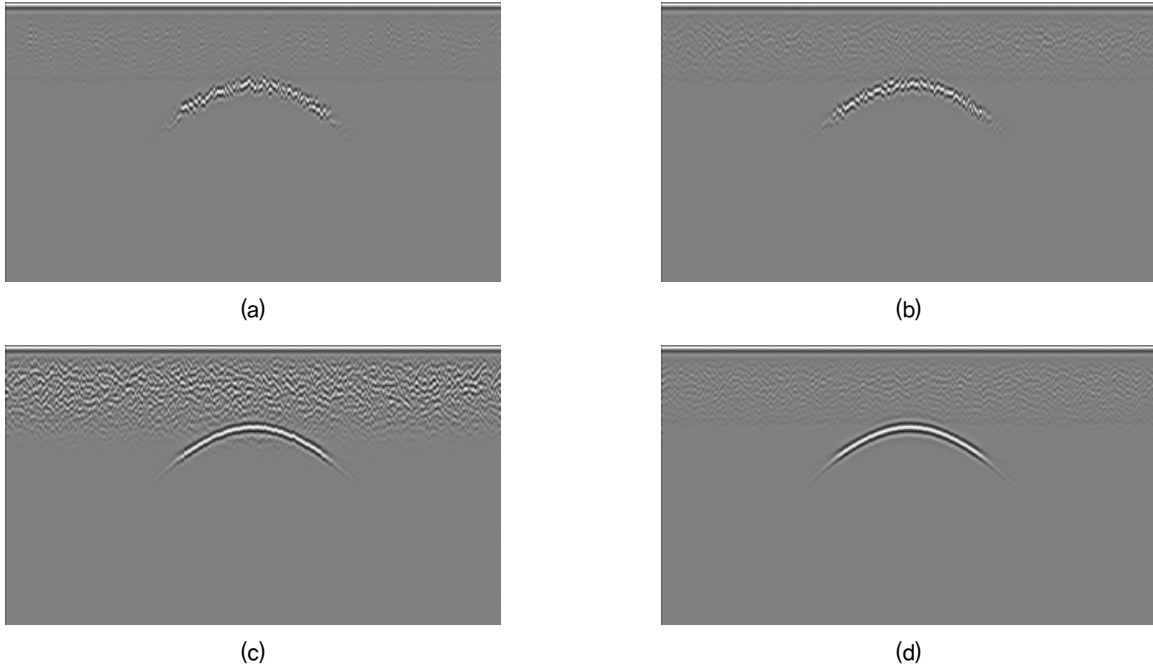


Fig. 5. Analysis result about fractal dimension (a) 0.5, (b) 1.5, (c) 2.5, (d) 3.5

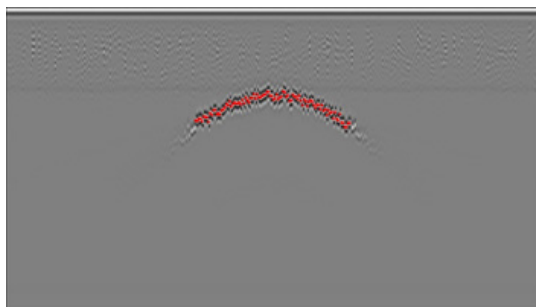


Fig. 6. FDTD Yee cell (Warren et al., 2016)

지반과 같은 형상을 보이는 것으로 확인되었다. 이는 차원수가 과도하게 증가하여 해석 지반의 물성이 고르게 분포하게 되어 불균질한 특성이 감소하는 경향을 보이는 것으로 판단된다. 따라서 적절한 프랙탈 차원수의 범위를 확인하기 위해 Fig. 6과 같은 차원수 0.5의 관로 반사신호를 Eq. (11)의 쌍곡선 방정식으로 곡선적합(Curve fitting)하여 각각의 차원수에 대한 오차를 계산하고 그 경향을 분석하였다. 분석에 사용된 차원수에 따른 반사신호 위치와 쌍곡선에 방정식에 의한 피팅결과는 Fig. 7에 도시하였다.

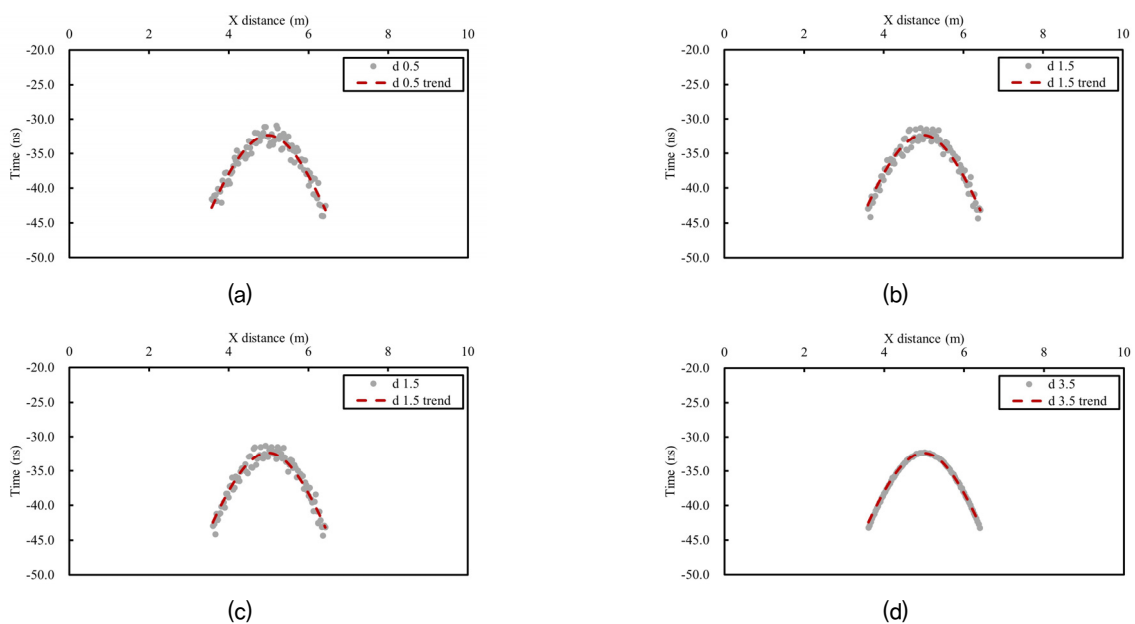


Fig. 7. Fitting result about fractal dimension (a) 0.5, (b) 1.5, (c) 2.5, (d) 3.5

Table 2. Result of fitting coefficient (fractal dimension = 0.5)

Fractal dimension	a	b	c	d
0.5	2.876	99.981	4.994	67.781

$$\frac{(x-c)^2}{a^2} - \frac{(y-d)^2}{b^2} = -1 \quad (11)$$

Table 2는 최소 오차 제곱법을 이용한 피팅 결과로 도출된 쌍곡선 방정식의 계수이다. 도출된 쌍곡선 방정식을 통해 차원수의 변화에 따른 오차를 계산하고, 이를 Fig. 8에 도시하였다.

Fig. 8의 결과를 통해 프랙탈 차원수가 2.0 이상인 경우 불확실성에 의한 오차가 급격하게 감소하는 경향을 확인할 수 있었다. 따라서, 지반의 불균질성에 따른 gpr 신호 특성 분석을 위해서는 2.0 이하의 프랙탈 차원수를 적용하는 것이 적절한 것으로 판단된다.

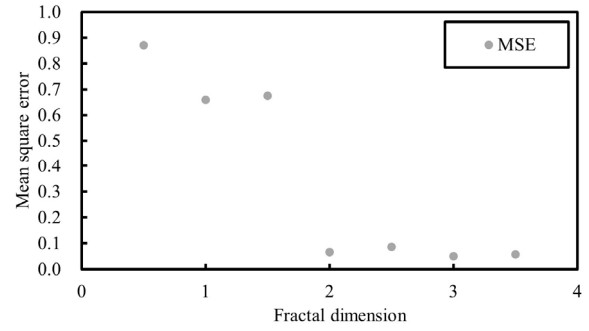


Fig. 8. Mean square error between cylinder signal and fitting result according to fractal dimension

3.4 지반의 함수비 차이에 따른 신호 특성

동일한 물성에서 함수비의 범위를 넓혀 가며 해석을 수행하고 수신 신호에 대한 분석을 수행하였다. 함수비는 0.15를 중심으로 0.01씩 증감하며 함수비의 범위를 넓혀 해석을 진행하였으며, 0.14~0.16에서 0.05~0.25까지 함수비의 범위를 증가시켜가며 해석을 진행하였다.

Fig. 9는 함수비의 변화에 따른 수치해석 결과, 관료에 의한

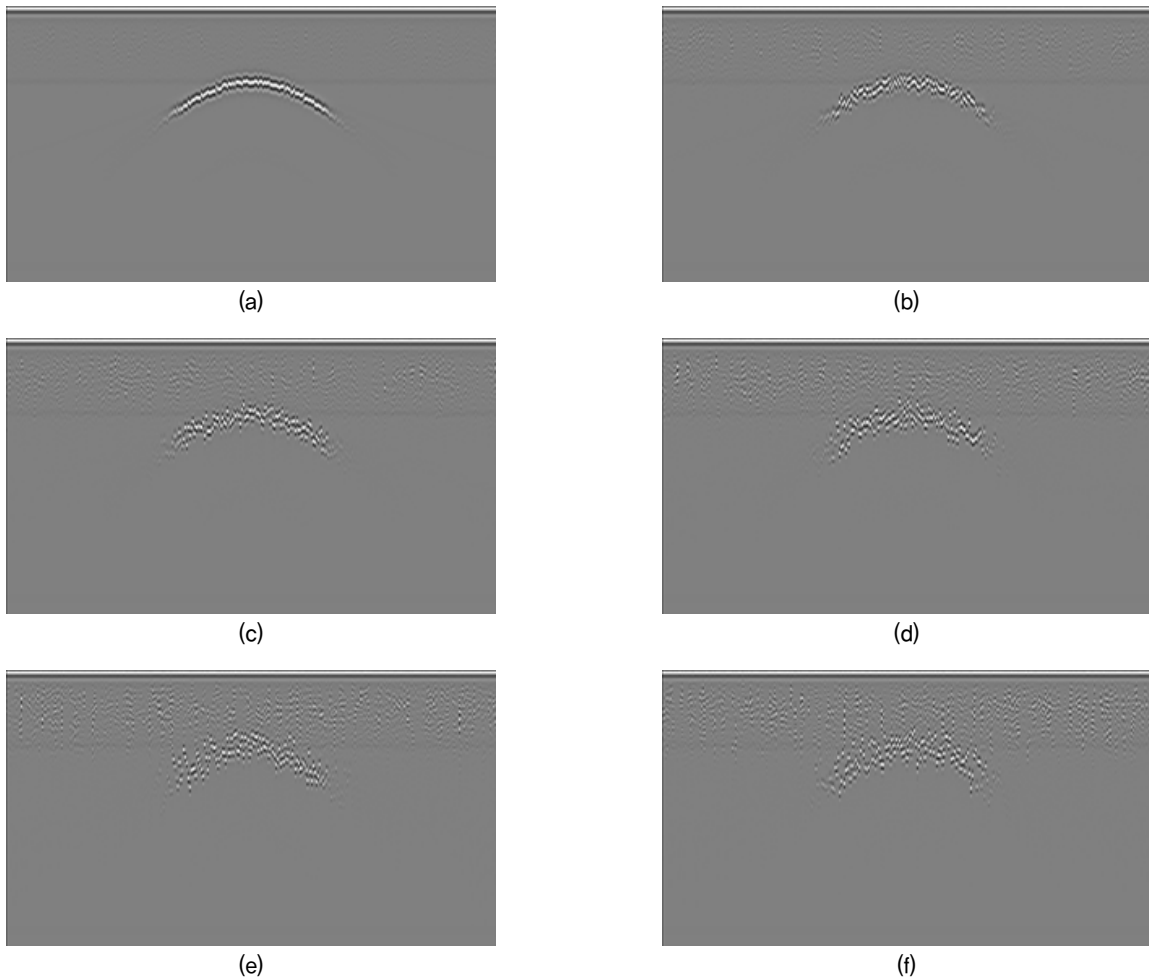


Fig. 9. Cylinder signal according to water content range (a) ± 0.01 , (b) ± 0.03 , (c) ± 0.05 , (d) ± 0.07 , (e) ± 0.09 , (f) ± 0.1 (based water content = 0.15)

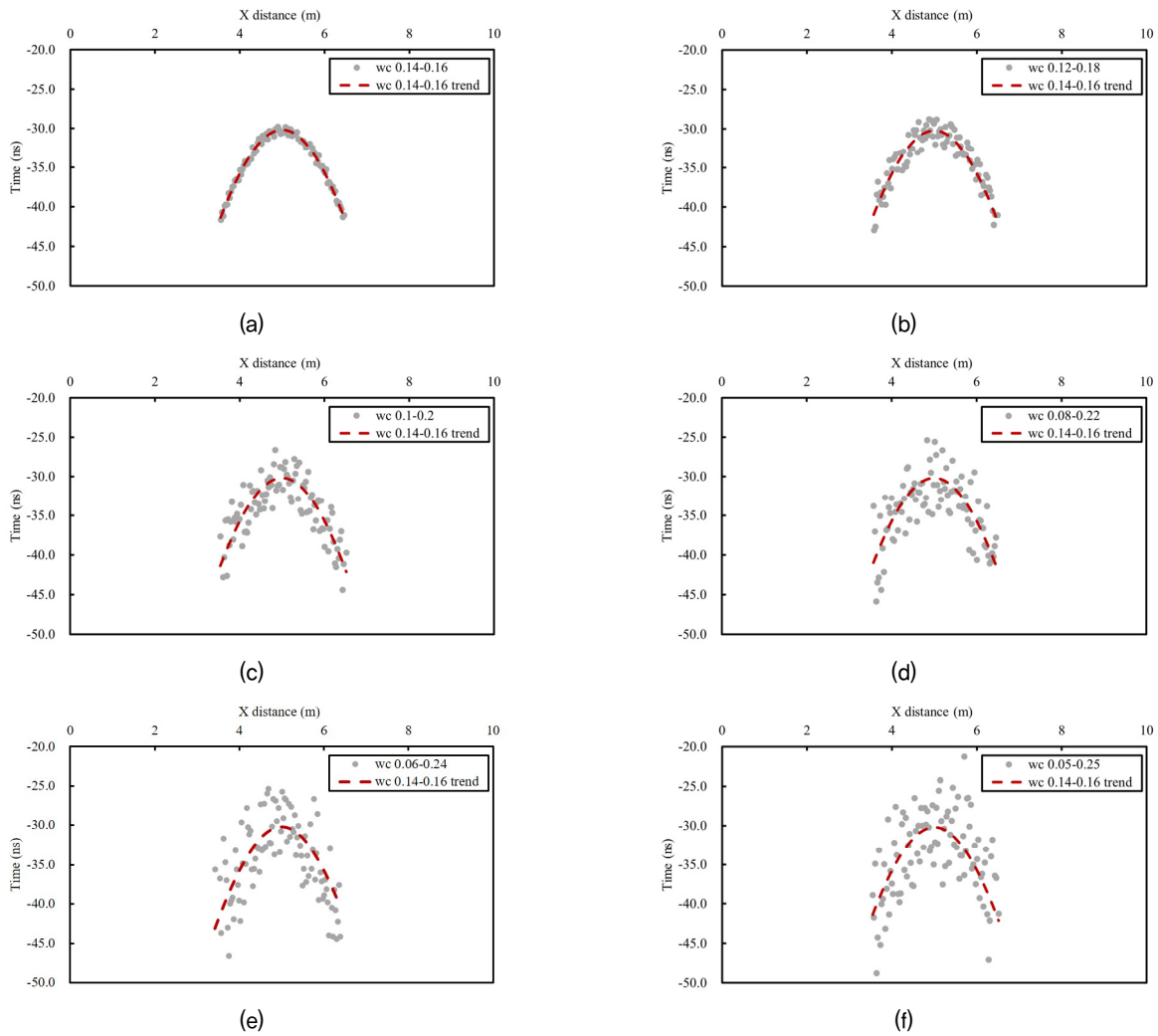


Fig. 10. Cylinder signal according to water content range
 (a) ± 0.01 , (b) ± 0.03 , (c) ± 0.05 , (d) ± 0.07 , (e) ± 0.09 , (f) ± 0.1 (based water content = 0.15)

반사파 신호의 경향 중 일부를 도시한 것이다. 함수비 차이의 증가에 따라 관로 반사 신호의 분산도가 증가하는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 이로 인해 쌍곡선 형태의 관로 특성이 점차 희미해지는 것을 확인할 수 있었다.

정량적인 분석을 위해 함수비 0.15 \pm 0.1의 해석데이터를 기준으로 쌍곡선 함수를 피팅하고, 이를 기준으로 함수비의 범위에 따른 관로에 의한 반사파 데이터를 Fig. 10에 도시하였다. 관로 반사신호 데이터들과 Fig. 10(a)의 피팅된 쌍곡선 방정식을 이용하여 평균제곱오차를 계산하여 Fig. 11에 도시하였다. 함수비의 범위가 증가할수록 평균 제곱오차가 거듭제곱으로 증가하는 경향을 보인다. 이는 함수비의 범위가 증가함에 따라 설정되는 지반유전율의 범위가 증가하고, 이로 인해 매질 내에서 파의 속도변화가 증가하여 반사파의 수신시간의 변화폭이 커지는 것으로 판단된다. 또한 관로특성을 획득할 때, 수신된 반사파 최대진폭의 80% 이상의 진폭을 보이는 시간을 추출했다. 그러나 함수비의 차이가 0.14 이상 나는 구간에서 Fig. 12와 같이 다수의 다른 파형이 추출

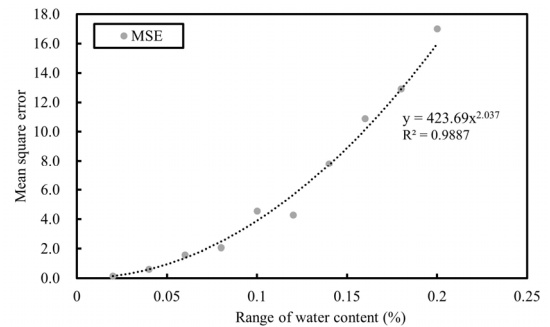


Fig. 11. Mean square error between cylinder signal and fitting result according to water content range

되는 것을 확인할 수 있었는데, 이는 관로에 의한 반사 신호와 유사한 진폭을 갖는 신호가 수신된다는 의미로 해석할 수 있다. 즉, 관로의 반사파와 노이즈의 크기가 유사해지기 때문에 관로의 특성 파악이 어렵다. 따라서, 해석의 유의성을 확보하기 위하여 함수비의 차이는 0.14 이하로 설정하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

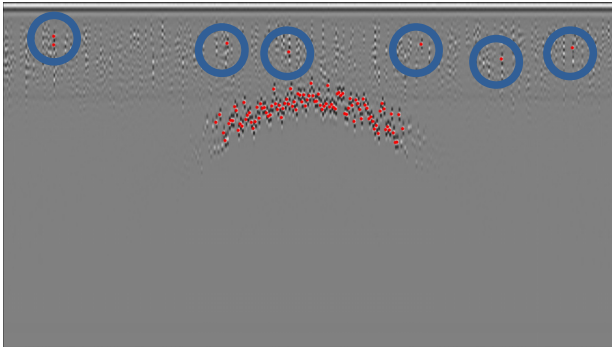


Fig. 12. Detection of noise signals due to increased water content range

4. 결 론

본 연구에서는 지반의 불균질성이 GPR 신호 특성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 수치해석을 수행하였다. 지반의 불균질성은 프랙탈 차원수와 지반의 함수비를 기준으로 반사파 신호를 분석하였으며, 이를 통해 도출된 결과는 다음과 같다.

- (1) 프랙탈 차원수의 따른 수치해석을 수행한 결과, 차원수가 2.0 이상이 되면 불균질성이 급격하게 감소하는 경향을 확인할 수 있었다. 이는 다양한 물성의 배치가 과도하게 작게 나누어져 배치되어 해석이 수행되는 단일 셀에서의 유전 특성이 균질해지기 때문인 것으로 판단된다. 따라서, 지반의 불균질성에 따른 GPR 신호 특성 분석을 위해서는 2.0 이하의 프랙탈 차원수를 적용하는 것이 적절한 것으로 판단된다.
- (2) 지반의 함수비의 범위에 따른 반사파 특성을 분석한 결과, 함수비의 범위가 증가함에 따라 관로의 반사파 도달 시간의 분산도가 증가하는 것으로 나타났다. 이는 프랙탈을 구성하는 지반의 유전율이 함수비에 영향을 많이 받기 때문인 것으로 판단된다. 또한 지반함수비의 차이가 0.14 이상 발생하면 수신신호와 노이즈의 크기가 유사해지기 해석의 유의성을 확보하기 위하여 함수비의 차이는 0.14 이하로 설정하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

본 연구를 통해 프랙탈 차원수와 지반의 공간적 변이 특성에 따른 GPR 신호의 특성을 분석하였다. 이를 통해 지반의 불균질성을 고려한 수치해석에 있어 고려해야 할 입력 변수에 따른 수신 신호의 변화를 확인할 수 있었다. 그러나 함수비의 평균 변화에 따른 신호 특성의 변화와 함수비의 크기에 따른 관로 탐색 가능한 관로의 깊이에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

감사의 글

본 논문은 행정안전부 “산지(경사지) 태양광 발전시설의 전주기 스마트 안전관리 기술 개발(20018265)”의 지원을 받아 작성되었음.

References

1. Chae, J., Ko, H., Lee, B. and Kim, N. (2019), A Study on the pipe position estimation in GPR images using deep learning based convolutional neural network, *Journal of Internet Computing and Services*, Vol. 20, No.4, pp. 39~46 (In Korean).
2. Dobson, M. C., Ulaby, F. T., Hallikainen, M. T. and El-Rayes, M. A. (1985), Microwave dielectric behavior of wet soil-Part II: Dielectric mixing models, *IEEE transactions on Geoscience and Remote sensing*(1), pp. 35~46.
3. Giannakis, I. (2016), Realistic numerical modelling of ground penetrating radar for landmine detection University of Edinburgh.
4. Giannakis, I., Giannopoulos, A. and Warren, C. (2015), A realistic FDTD numerical modeling framework of ground penetrating radar for landmine detection, *IEEE journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing*, Vol. 9, No. 1, pp. 37~51.
5. Giannopoulos, A. (1998), The investigation of transmission-line matrix and finite-difference time-domain methods for the forward problem of ground probing radar University of York.
6. Giannopoulos, A. (2005), Modelling ground penetrating radar by GprMax, *Construction and building materials*, Vol. 19, No. 10, pp. 755~762.
7. Hyun, Seung-Yeup (2017), A study on characteristics of ground-penetrating radar signals for detection of buried pipes, *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, Vol. 28, No. 1, pp. 42~48 (In Korean).
8. Kim, Won-Dae, Hwang, Hwan-Gook, Park, Jae-Woo and Chae, Myung-Jin (2008), GPR inspection for surrounding soil of underground pipes, *Korea Institute of Construction Engineering and Management*, pp. 358~363 (In Korean).
9. Mandelbrot, B. (1967), How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension. *science*, Vol. 156, No. 3775, pp. 636~638.
10. Peplinski, N. R., Ulaby, F. T. and Dobson, M. C. (1995), Dielectric properties of soils in the 0.3-1.3-GHz range, *IEEE transactions on Geoscience and Remote sensing*, Vol. 33, No. 3, pp. 803~807.
11. Pham, M.-T. and Lefèvre, S. (2018), Buried object detection from B-scan ground penetrating radar data using Faster-RCNN, *IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*
12. Warren, C., Giannopoulos, A. and Giannakis, I. (2016), gprMax: Open source software to simulate electromagnetic wave propagation for Ground Penetrating Radar, *Computer Physics Communications*, 209, pp. 163~170.
13. Zhou, X., Chen, H. and Li, J. (2018), An automatic GPR B-Scan image interpreting model, *IEEE transactions on Geoscience and Remote sensing*, 56, pp. 3398~3412.