

비균일 지하에 매설된 금속관 탐지를 위한 지하탐사레이다 신호의 수치 모의계산

Numerical Simulation of Ground-Penetrating Radar Signals for Detection of Metal Pipes Buried in Inhomogeneous Grounds

현 승 업

Seung-Yeup Hyun

요 약

지하의 비균일성이 지하탐사레이다(GPR) 신호에서 금속관 탐지에 미치는 영향을 수치계산으로 조사하였다. 지하의 비균일성을 모델링하기 위해서 연속적인 랜덤 매질(CRM) 생성기법을 도입하였고, GPR 신호의 전자기 모의계산을 위해 유한차분시간영역(FDTD)법을 구현하였다. 랜덤 비균일 지하에 대한 상대 유전율 분포의 표준편차와 상관길이의 변화에 따라 매설된 금속관의 GPR 신호를 수치 모의계산으로 비교하였다. 지하의 비균일성이 증가함에 따라 지하 클러터의 영향으로 인하여 매설관에 의한 GPR 신호가 심하게 왜곡되었다.

Abstract

The effects of subsurface inhomogeneities on the detection of buried metal pipes in ground-penetrating radar(GPR) signals are investigated numerically. To model the electrical properties of the subsurface inhomogeneities, the continuous random media(CRM) generation technique is introduced. For the electromagnetic simulation of GPR signals, the finite-difference time-domain(FDTD) method is implemented. As a function of the standard deviation and the correlation length of the relative permittivity distribution for a randomly inhomogeneous ground, the GPR signals of the buried metal pipes are compared using numerical simulations. As the subsurface inhomogeneities increase, the GPR signals of the buried pipes are distorted because of the effect of the subsurface clutter.

Key words: Continuous Random Media, Finite-Difference Time-Domain Method, Ground-Penetrating Radar, Inhomogeneous Ground, Metal Pipes

I. 서 론

지하탐사레이다(Ground-Penetrating Radar: GPR)는 지표면에서 지하로 광대역 전자기 신호의 송수신을 통해 지하의 상태를 비파괴적으로 알아내는 방법으로서 상하수

도관, 가스관, 통신구 등의 지하매설물 탐사를 비롯하여 지반탐사, 자원탐사 등에 많이 활용한다^{[1],[2]}. 균일 지하매질 속에 매설관이 존재하는 경우 지하와 매설관이 서로 전기적 특성 차이가 충분히 있지만 하면 GPR 신호의 B-scan 영상에서 매설관은 쌍곡선 패턴(hyperbolic pattern)^[2]

「이 논문은 2017학년도 제주대학교 교원성과지원사업에 의하여 연구되었음.」

제주대학교 전기전자통신컴퓨터공학부(School of Electrical, Electronic, Telecommunication and Computer Engineering, Jeju National University)

· Manuscript received October, 30, 2017 ; Revised November, 29, 2017 ; Accepted December, 22, 2017. (ID No. 20171030-114)

· Corresponding Author: Seung-Yeup Hyun (e-mail: syhyun@jejunu.ac.kr)

을 형성한다. 그러므로 GPR 시스템의 신호 대 잡음비와 해상도 조건만 만족하면 GPR로 균일 지하매질 속의 매설관 탐지는 비교적 용이하다^[2]. 최근 2년간 본 학회의 논문에 게재된 매설관에 관련된 GPR 신호 특성에 대한 연구동향을 살펴보면, 매설된 금속관 주변의 공동(cavity)탐지를 위한 GPR 모의실험^[3], 인접한 두 개의 매설관 탐지용 GPR 안테나의 해상도에 관한 전자파 수치해석^[4], 매설된 비금속관 속에 채워진 매질의 유전율 변화에 따른 GPR 신호 특성에 관한 전자파 수치해석^[5] 등이 있다. 기존 연구^{[3]~[5]}는 모두 균일한 분포를 갖는 지하매질에 대해서만 다루었다. 그러나 실제 지하매질의 전기적 특성은 위치마다 다르고, 동일한 위치에서도 깊이에 따라 달라지는 비균일성(inhomogeneity)을 갖고 있는 경우가 대부분이다. 그래서 비균일 지하매질 속의 매설관을 탐지하기 위해서는 지하의 비균일성이 GPR 신호에 미치는 영향에 대한 연구가 필요하다. 실제 지하의 비균일 환경은 매우 다양하기 때문에 GPR 측정만으로 분석하기는 매우 어려울 뿐만 아니라 오랜 시간과 막대한 비용이 소요된다. 이에 대한 대안으로 지하의 비균일성을 통계적인 기법으로 모델링하고, 전자파 수치해석기법으로 해석하는 방법이 있다. 비균일 지하를 모델링하는 대표적인 기법은 크게 2가지가 있다. 하나는 랜덤 분포를 갖는 이산적인 산란체(randomly distributed discrete scatterers)의 집합으로 다루는 이산적인 랜덤매질(Discrete Random Media: DRM)^[6]로 다루는 기법이고, 다른 하나는 균일한 지하매질에 연속적인 랜덤변동(continuously random fluctuation) 성분의 중첩인 연속적인 랜덤매질(Continuous Random Media: CRM)^{[7],[8]}로 생성하는 기법이다. DRM기법은 이산적인 산란체들 각각의 유전율, 위치, 모양, 밀도, 분포 등 고려해야 할 변수가 너무 많아서 다루기 불편하다. 이와는 달리, CRM은 지구통계학(geostatistics)에서 주로 다루는 상관함수(correlation function)로 지하의 비균일성을 모델링하면 2가지 변수인 표준편차(standard deviation)와 상관길이(correlation length)만으로 쉽게 고려할 수 있다^[8]. 실제 GPR은 주로 초광대역 펄스(ultrawideband pulse)의 송수신으로 운용하므로, 비균일 지하에 대한 GPR 신호의 전자파 수치해석은 FDTD(Finite-Difference Time-Domain)^[9]법이 적합하다. 그래서 본 논문에서는 비균일 매질 속에 매설된 금속

관을 탐지하기 위한 GPR 신호의 특성을 CRM과 FDTD를 이용한 수치 모의계산으로 조사하였다.

II. 비균일 지하의 유전율 분포 생성기법

비균일 지하매질의 유전율 분포는 CRM^{[7],[8]} 기법을 도입하여 생성하였다. 2차원 직각좌표계의 임의의 위치(x, y)에서 비균일성을 갖는 상대유전율 $\epsilon_r(x, y)$ 는 평균(mean) ϵ_m 을 중심으로 랜덤 변동(random fluctuation) $\Delta\epsilon_f(x, y)$ 의 중첩으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_r(x, y) = \epsilon_m + \Delta\epsilon_f(x, y) \quad (1)$$

여기서 랜덤 변동성분 $\Delta\epsilon_f(x, y) = 0$ 인 경우에는 지하의 모든 위치에서 상대유전율이 ϵ_m 인 균일 매질(homogeneous medium)이 된다. 만일 $\Delta\epsilon_f(x, y) \neq 0$ 인 경우에는 평균 ϵ_m 을 중심으로 랜덤성(randomness)을 갖는 비균일 매질(inhomogeneous media)이 된다. $\Delta\epsilon_f(x, y)$ 는 2차원 공간 스펙트럼 함수(spectrum function) $F(k_x, k_y)$ 에 대한 2차원 역푸리에 변환(inverse Fourier transform)으로서 다음과 같다.

$$\Delta\epsilon_f(x, y) = \frac{1}{(2\pi)^2} \iint_{-\infty}^{+\infty} F(k_x, k_y) e^{-jk_x x} e^{-jk_y y} dk_x dk_y \quad (2)$$

여기서 k_x 와 k_y 는 2차원 공간의 x 축과 y 축에 대한 파수 벡터(wavenumber vector)이다. 2차원 공간 스펙트럼 함수 $F(k_x, k_y)$ 는 진폭 스펙트럼 $A(k_x, k_y)$ 와 위상 스펙트럼 $\Phi(k_x, k_y)$ 으로 다음과 같이 구성할 수 있다.

$$F(k_x, k_y) = A(k_x, k_y) e^{j\Phi(k_x, k_y)} \quad (3)$$

여기서 $A(k_x, k_y)$ 는 전력밀도함수(Power Spectral Density Function: PSDF) $R(k_x, k_y)$ 의 제곱근으로 다음과 같다.

$$A(k_x, k_y) = \sqrt{R(k_x, k_y)} \quad (4)$$

일반적으로 진폭스펙트럼 $A(k_x, k_y)$ 는 고려할 지하환경에 따라 적절한 함수로 선택하는데, 지구통계학에서는 비균일 지하를 모델링하기 위해 주로 다음과 같은 가우시안(Gaussian) 자기상관함수(Auto-Correlation Function: ACF) $r(\tau_x, \tau_y)$ 를 사용한다^[8].

$$r(\tau_x, \tau_y) = h^2 e^{-(\tau_x^2 + \tau_y^2)/l_c^2} \quad (5)$$

여기서 τ_x 와 τ_y 는 각각 x 축과 y 축 방향을 따라 인접한 두 지점 사이 길이의 차에 해당하는 지연길이(lag length)이다. h 는 지하의 비균일성에 대한 변동범위를 결정하는 표준편차이고, l_c 는 비균일 지하매질 영역에 대한 x 축 또는 y 축 방향을 따라 거리에 대한 상관관계(correlation)를 나타내는 상관길이이다. 예를 들어, 표준편차 $h=0$ 인 경우에는 지하매질의 모든 위치에서 상대유전율이 ϵ_m 으로 동일한 값을 갖는 균일 매질이 된다. 이와는 달리 표준편차 $h \neq 0$ 인 경우에는 상관길이 l_c 가 증가할수록 공간적으로 상관도가 높은 유전율 분포를 갖는 비균일 매질을 형성한다.

식 (5)를 2차원 공간(τ_x, τ_y)에 대한 푸리에 변환을 수행하면 다음과 같은 $R(k_x, k_y)$ 가 된다.

$$\begin{aligned} R(k_x, k_y) &= \iint_{-\infty}^{+\infty} r(\tau_x, \tau_y) e^{jk_x \tau_x} e^{jk_y \tau_y} d\tau_x d\tau_y \\ &= h^2 l_c^2 \pi e^{-(k_x^2 + k_y^2) l_c^2 / 4} \end{aligned} \quad (6)$$

식 (3)에서 위상스펙트럼 $\Phi(k_x, k_y)$ 는 구간 $[0, 2\pi]$ 에서 가우시안 분포를 따르는 확률밀도함수(Probability Density Function: PDF)에 해당하는 난수(random number)로 생성할 수 있다.

III. GPR 신호의 모의계산 결과

GPR의 운용 상황은 그림 1과 같이 비균일 지하 매질 속에 금속관이 매설된 경우로 FDTD 공간영역을 구성하였다. 비균일 지하매질은 앞의 II절에서 다룬 CRM법을 이용하여 생성하였고, 지표면을 따라 수평방향인 x 축을 따라 GPR을 이동시키면서 광대역 전자기 펄스의 송수신으로 탐사 자료를 획득하는 것을 FDTD로 모의계산하였다. FDTD 공간영역의 최외각 경계에서 전파기파의 무반사 흡수를 위해 CPML(Convolution Perfectly Matched Layer)^[10]을 적용하였다.

GPR의 송신신호는 중심주파수 250 MHz에서 최대이고, 하위 10 %의 주파수 대역이 약 20~700 MHz까지 분포하는 미분형 가우시안 펄스(differential Gaussian pulse) 파형을 사용하였다. 지하매질의 상대유전율 $\epsilon_r(x, y)$ 는 평균 $\epsilon_m=7.5$ 이고, 표준편차($h=0.5 \sim 1.5$)와 상관길이($l_c=5 \sim 15$

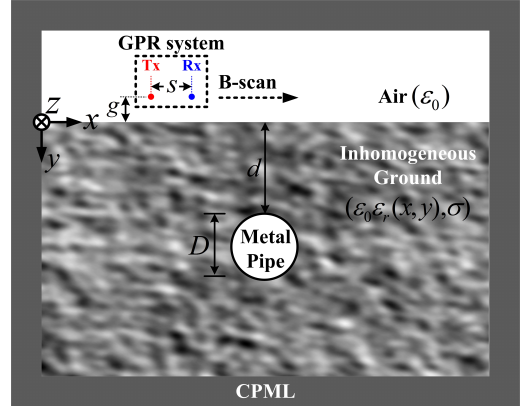


그림 1. GPR 모의계산의 FDTD 공간 영역
Fig. 1. FDTD space of GPR simulation.

cm)의 선택에 따라 랜덤한 비균일 분포를 갖도록 생성하였다. CRM 기법으로 생성한 비균일 지하매질의 상대유전율 분포를 검증하기 위해서 CRM으로 생성한 유전율 분포로부터 역으로 PDF와 ACF를 구한 후 통계량(평균, 표준편차, 상관길이)을 계산하여 원래의 이론적인 분포함수 모델과 비교한 결과 표 1과 같이 거의 일치하였다. 지하의 도전율은 $\sigma=0.1$ S/m로서 균일한 값으로 가정하였다.

탐지할 표적은 상수도관으로 많이 사용하는 지름 $D=20$ cm인 금속관이 지표면으로부터 깊이 $d=1$ m에 매설된 상황으로 설정하였다. FDTD 모의계산을 위한 공간영역은 최소 파장에 대해 약 10분의 1에 해당하는 공간간격 $\Delta x=\Delta y=1$ cm인 정사각형 격자로 구성하였고, 시간영역

표 1. CRM 기법으로 생성한 비균일 지하의 상대유전율 분포의 검증

Table 1. Validation of relative permittivity distribution for the inhomogeneous ground generated by using the CRM technique.

Statistics	Method	Gaussian distribution function model (theory)	CRM results (simulation)	Relative error [%]
	Mean	7.5	7.5	0.00
Relative permittivity profile	Standard deviation	1.5	1.4979	0.14
	Correlation length	15 cm	14.5 cm	3.33

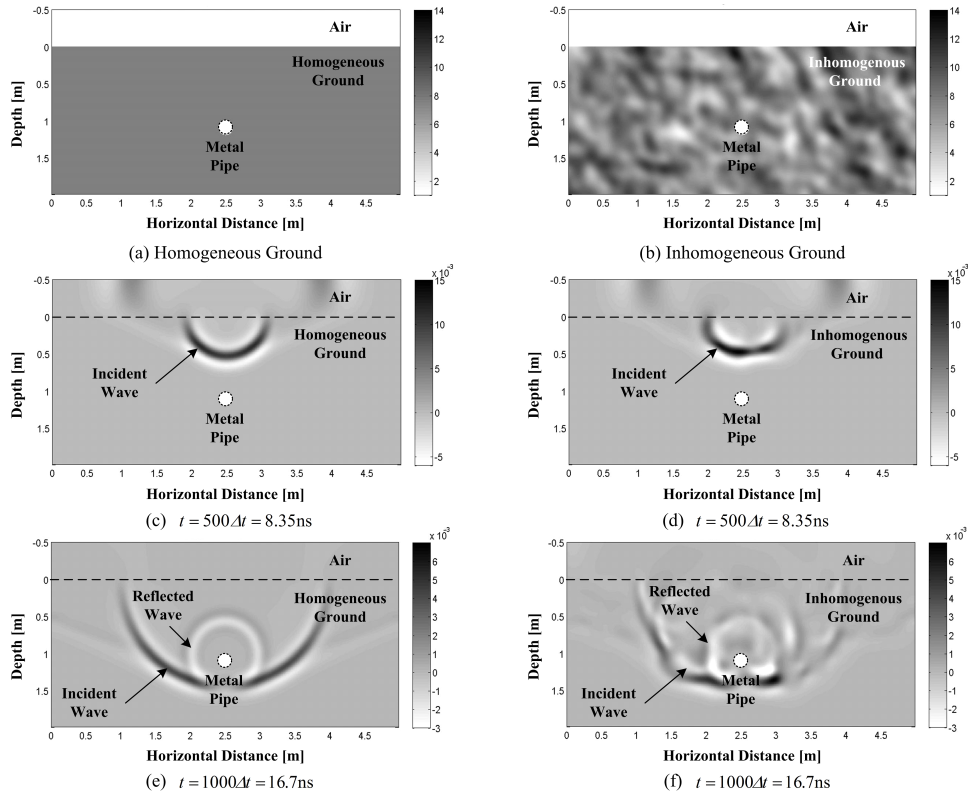


그림 2. 균일 및 비균일 지하 매질 속에 각각 금속관이 매설된 경우에 대한 상대유전율의 공간 분포와 전자기파 전파의 스냅 샷

Fig. 2. Spatial distribution of relative permittivity profile and snapshot of electromagnetic wave propagation in cases of metal pipes buried in homogeneous and inhomogeneous grounds, respectively.

은 CFL(Courant-Friedrichs-Lewy) 조건^[9]을 만족하는 시간 간격 $\Delta t = 16.7$ ps마다 최대 3,000개의 시점까지 고려하였다. GPR 시스템의 송수신 안테나 사이의 간격 $s = 10$ cm 이고, 지표면으로부터 높이 $g = 2$ cm에서 수평방향인 x 축을 따라 이동시키면서 GPR 신호를 획득하는 상황을 FDTD로 모의계산하였다.

첫 번째로 그림 2와 같이 지하매질의 균일/비균일 특성에 따른 전자기파의 전파특성을 FDTD 모의계산으로 비교하였다. 그림 2(a)는 균일한 지하매질($\epsilon_m = 7.5$, $h = 0$) 속에 금속관이 매설된 경우 수평방향과 깊이 방향에 대한 2차원 공간영역 상의 상대유전율 분포를 나타낸 것이다. 그림 2(b)는 비균일 지하매질($\epsilon_m = 7.5$, $h = 1.5$, $l_c = 15$ cm) 속에 금속관이 매설된 경우의 상대유전율의 분포에 해당한다. 그림 2(a)와 그림 2(b)인 각각의 상황에 대해 수평방

향으로 $x = 2.5$ m 지점에 GPR 시스템이 위치한 경우 광대역 펄스를 지하로 송신하여 금속관에 의해 반사되기 이전의 시점 $t = 500\Delta t = 8.35$ ns에서 2차원 공간영역 상의 전계 $E_z(x, y)$ 분포를 그레이 스케일(gray-scale)로 나타낸 것이 각각 그림 2(c)와 그림 2(d)이다. 또한 지하에 매설된 금속관에 의해 반사된 후의 시점 $t = 1000\Delta t = 16.7$ ns에서 공간영역 상의 전계 분포는 각각 그림 2(e)와 그림 2(f)이다. 그림 2(c)에 의하면 입사파(incident wave)가 균일 지하매질에 매설된 금속관 표적을 만나기 전에는 원형의 파면(wavefront)을 그대로 유지한다. 매설된 금속관에 의한 반사된 이후의 시점에는 그림 2(e)처럼 반전된 원형 파면이 지표면 방향으로 전파된다. 이와는 달리, 비균일 지하매질인 경우에는 그림 2(d)와 그림 2(f)처럼 지하의 비균일성에 의한 복잡한 산란(scattering)현상으로 인하여 입사

파의 파면뿐만 아니라, 매설된 금속관 표적에 의한 반사파의 파면도 심하게 왜곡되었고, 표적 신호의 강도가 약해진다는 것을 알 수 있다.

두 번째로 비균일 지하매질의 비균일성을 좌우하는 두 변수인 표준편차($h=0.5, 1.0, 1.5$)와 상관길이($l_c=5, 10, 15$ cm)의 변화에 따른 GPR 신호를 FDTD 모의계산으로 획득하여 B-scan 영상을 비교하면 그림 3과 같다. 그림 3에서 각각의 GPR B-scan 영상은 지표면 상의 수평방향으로 1 m에서 4 m 지점까지 총 3 m 구간을 10 cm 간격으로 31 개의 지점에서 GPR의 송수신으로 획득한 A-scan 탐사자

료를 FDTD 모의계산하고, 이러한 A-scan 탐사자료들을 GPR 안테나를 수평방향으로 이동시킨 거리와 지연시간을 두 축으로 하는 지하의 2차원 단면 영상으로 가시화한 것이다. 비균일 지하매질의 상대유전율 분포는 표준편차 h 가 증가할수록 지하의 유전율 변동범위가 넓어지므로, 결국 비균일성이 증가한다. 그래서 비균일 지하의 표준편차가 $h=0.5$ 로 비교적 작은 경우에는 그림 3(a)~그림 3(c)처럼 지하의 비균일성에 의한 클러터가 지표면 근방에만 약하게 나타나기 때문에 1 m 깊이에 매설된 금속관에 의한 쌍곡선 패턴은 거의 왜곡되지 않으면서 뚜렷하게 나

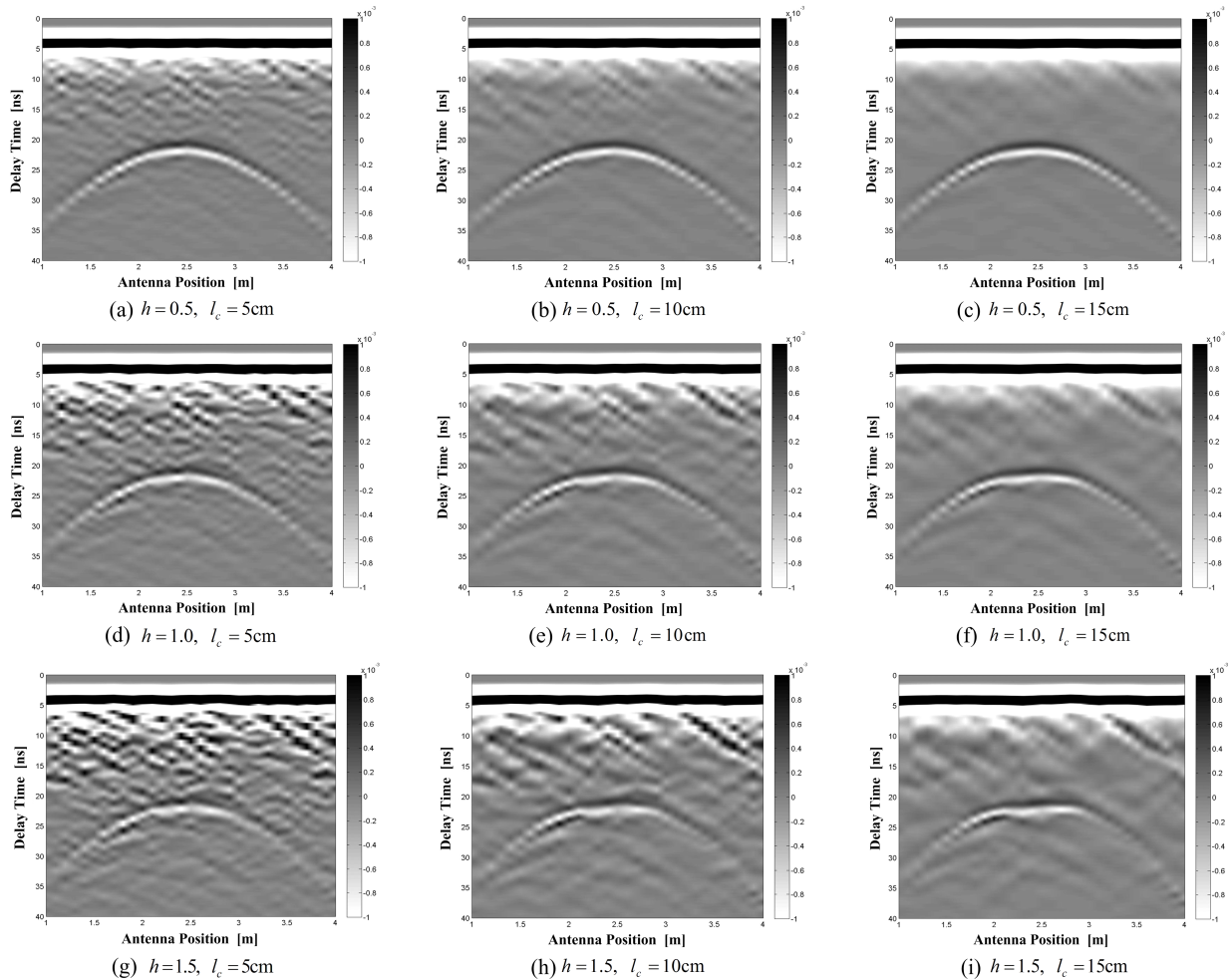


그림 3. 비균일 지하의 비균일성(표준편차 h , 상관길이 l_c) 변화에 따른 GPR B-scan 영상의 비교

Fig. 3. Comparison of GPR B-scan images as a function of subsurface inhomogeneities (standard deviation h , correlation length l_c) in inhomogeneous grounds.

타나는 것을 볼 수 있다. 비균일 지하의 표준편차가 각각 $h=1.0$ 과 $h=1.5$ 로 증가하면 그림 3(d)~그림 3(i)처럼 지하의 비균일성에 의한 클러터(clutter)의 영향이 금속관 표적에 의한 쌍곡선 패턴의 강도보다 높아지기 때문에 표적 신호의 탐지가 점점 어려워진다. 특히 비균일 지하매질의 상대유전율 분포의 표준편차 h 가 동일한 경우에 상관길이 l_c 가 증가하면 GPR B-scan 영상에서 비균일성에 의한 클러터의 경사 패턴(oblique pattern)이 강해지고, 금속관 표적의 쌍곡선 패턴이 심하게 왜곡되는 것을 볼 수 있다. 균일매질과 비균일 매질(그림 3(a), 3(e), 3(i))에서 금속관 표적이 매설된 위치인 $x=2.5$ m 지점에서 GPR 송수신 안테나 사이의 직접결합(direct coupling) 신호 성분을 고유영상필터링(eigenimage filtering)^[11]으로 제거한 후 지하에서 되돌아온 산란파 성분만을 추출하여 비교하면 그림 4와 같이 된다. 그림 4에서 균일한 매질($\epsilon_m=7.5$, $h=0$) 속에 금속관이 매설된 경우에는 금속관 표적에 의한 산란파 신호만 약 20 ns 근방에 존재하였다. 비균일 지하인 경우에는 지하의 비균일성에 의한 클러터가 GPR 신호를 수신하는 모든 시간에 중첩으로 나타났다. 표 2는 그림 4에서 균일매질인 경우의 금속관 표적 신호를 기준으로 비균일 매질에서 금속관 표적 신호의 도달시간과 침투값에 대한 상대오차를 비교한 것이다. 비균일 지하에서

표 2. 그림 4에서 금속관 표적신호에 대한 도달시간과 침투값의 정확성 비교

Table 2. Accuracy comparison of the arrival time and the peak value of the metal pipe signals in Fig. 4.

Metal pipe signal Underground medium	Arrival time [ns]	Relative error [%]
	Peak value [mV/m]	
Homogeneous ground ($h=0$)	21.83	-
	-0.828	-
Inhomogeneous ground #1 ($h=0.5$, $l_c=5$ cm)	21.95	0.55
	-0.972	17.42
Inhomogeneous ground #2 ($h=1.0$, $l_c=10$ cm)	22.12	1.32
	-0.786	5.06
Inhomogeneous ground #3 ($h=1.5$, $l_c=15$ cm)	22.40	2.61
	-0.647	21.88

상대유전율 분포의 비균일성을 나타내는 표준편차($h=0.5$, 1.0, 1.5)와 상관길이($l_c=5$, 10, 15cm)로 증가함에 따라 GPR 신호에서 금속관 표적신호의 도달시간은 0.55~2.61 %의 오차를 보였고, 침투값은 5.06~21.88 %로서 비교적 큰 오차가 나타났다. 따라서 실제 지하에서 비균일성이 심할수록 비균일 클러터에 의해 금속관 표적신호의 B-scan 영상에서 쌍곡선 패턴을 왜곡할 뿐만 아니라, A-scan 자료에서 금속관 표신신호의 도달시간과 침투값의 오차가 점차 증가하여 GPR로 비균일 지하에 매설된 금속관 탐지의 정확성이 저하된다는 것을 알 수 있다.

IV. 결 론

지하매질의 비균일성이 매설된 금속관을 GPR로 탐지하는데 미치는 영향을 CRM과 FDTD법을 함께 이용한 수치 모의계산으로 조사하였다. 비균일 지하매질의 상대유전율 분포는 CRM기법을 도입하여 생성하였고, 지하매질의 비균일성을 결정하는 표준편차와 상관길이의 변화에 따라 지하에 매설된 금속관에 의한 GPR 신호를 FDTD 모의계산하여 다음과 같은 2가지 결과를 얻었다. (1) 균일 지하매질에서는 전자기파의 파면이 원형으로 왜곡없이 전파되는 반면에 비균일 지하매질에서는 위치마다 유전율 분포가 달라짐으로 인한 복잡한 산란현상에 의해 왜곡된 파면으로 전파하였다. (2) 비균일 지하의 표준편차와

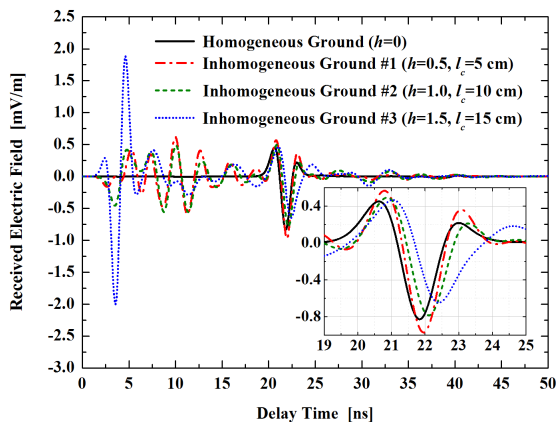


그림 4. 균일 지하와 비균일 지하 (그림 3(a), 3(e), 3(i))에서 $x=2.5$ m 지점의 GPR A-scan 자료 비교 결과
Fig. 4. Comparison results of GPR A-scan data at $x=2.5$ m on homogeneous ground and inhomogeneous grounds (Fig. 3(a), 3(e) and 3(i)).

상관길이 커질수록 GPR의 B-scan 영상에서 지하의 비균일성에 의한 클러터 성분의 영향이 커져서 금속관 표적 신호의 쌍곡선 패턴을 왜곡할 뿐만 아니라 도달시간과 침투깊이의 오차가 점차적으로 증가하였다. 따라서 GPR로 균일 지하인 경우보다 비균일 지하에 매설된 금속관 표적 탐지의 정확성은 지하의 비균일성이 어느 정도인가에 따라 좌우된다는 것을 알 수 있었다. 향후에는 본 논문에서 다룬 수치 모의계산과 GPR 측정 자료를 연계하여 실제 지하환경에 대한 비균일성을 예측할 수 있는 모델을 개발하고, 지하의 비균일성에 둔감한 GPR 시스템과 신호처리기술의 개발에 활용될 예정이다.

References

- [1] D. J. Daniels, D. J. Gunton, and H. F. Scott, "Introduction to subsurface radar," *Communications, Radar and Signal Processing, IEE Proceedings F*, vol. 135, no. 4, pp. 278-320, Aug. 1988.
- [2] D. J. Daniels, *Ground Penetrating Radar*, 2nd ed. London, The Institution of Electrical Engineers (IEE), 2004.
- [3] 현승엽, "매설관 주변 지하 공동 탐지를 위한 지하 탐사 레이더의 모의실험," 한국전자과학회논문지, 27(2), pp. 131-137, 2016년 2월.
- [4] G. Alsharahi, A. M. M. Mostapha, A. Faize, and A. Driouach, "Modeling and simulation resolution of ground-penetrating radar antennas," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 16, no. 3, pp. 182-190,

- Jul. 2016.
- [5] 현승엽, "지하 매설관 탐지를 위한 지하탐사레이다 신호의 특성에 관한 연구," 한국전자과학회논문지, 28(1), pp. 42-48, 2017년 1월.
- [6] L. Gurel, U. Oguz, "Simulations of ground-penetrating radars over lossy and heterogeneous grounds," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 39, no. 6, pp. 1190-1197, Jun. 2001.
- [7] C. D. Moss, F. L. Teixeira, Y. E. Yang, and J. A. Kong, "Finite-difference time-domain simulation of scattering from objects in continuous random media," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 40, no. 1, pp. 178-186, Jan. 2002.
- [8] L. Klimeš, "Correlation functions of random media," *Pure and Applied Geophysics*, vol. 159, no. 7-8, pp. 1811-1831, Jul. 2002.
- [9] A. Taflov, S. C. Hagness, *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method*, 3rd ed. Boston, Artech House, 2005.
- [10] J. A. Roden, S. D. Gedney, "Convolution PML(CPML): An efficient FDTD implementation of the CFS-PML for arbitrary media," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 27, no. 5, pp. 334-339, Dec. 2000.
- [11] B. Cagnoli, T. J. Ulrych, "Singular value decomposition and wavy reflections in ground-penetrating radar images of base surge deposits," *Journal of Applied Geophysics*, vol. 48, no. 3, pp. 175-182, Oct. 2001.

현 승 엽



1997년 2월: 제주대학교 통신공학과 (공학사)
 1999년 2월: 고려대학교 전파공학과 (공학석사)
 2008년 8월: 고려대학교 전파공학과 (공학박사)
 2012년 3월~현재: 제주대학교 전기전자

통신컴퓨터공학부 부교수

[주 관심분야] 광대역 안테나, 초고주파 영상화 기법, 지하탐사레이다 시스템, 플라즈마 조명 시스템