

## 비균일 지하에 묻혀있는 유전체 충전 비금속관에 의한 지표투과레이다 응답의 특성 변화

### Characteristic Changes in Ground-Penetrating Radar Responses from Dielectric-Filled Nonmetallic Pipes Buried in Inhomogeneous Ground

현 승 업

Seung-Yeup Hyun

#### 요 약

비균일 지하에 매설된 비금속관에 의한 지표투과레이다(GPR) 신호 특성의 변화를 수치 모의계산을 통해 비교하였다. 지하의 상대유전율 분포는 연속적인 랜덤 매질(CRM) 기법을 이용하여 생성하였다. 비균일 지하에 매설된 비금속관 속을 채우고 있는 물질의 상대유전율 변화에 따른 GPR 신호를 유한차분시간영역(FDTD)법으로 모의계산하였다. 균일 지하와는 달리, 비균일 지하에 매설된 비금속관의 전방 볼록면과 후방 오목면에 의해 발생한 각각의 반사파에 대한 왜곡 특성이 비금속관 내부와 외부 사이의 유전율 차이에 따라 달라짐을 보였다.

#### Abstract

The variation of ground-penetrating radar(GPR) signal characteristics from dielectric-filled nonmetallic pipes buried in inhomogeneous ground are compared through a numerical simulation. The relative permittivity distribution of the ground is generated by using the continuous random media(CRM) technique. As a function of the relative permittivity of the material filling the nonmetallic pipe buried in the ground media, GPR signals are simulated by using the finite-difference time-domain(FDTD) method. We show that, unlike the case for homogeneous ground, the distortion characteristics of the reflected waves caused by the front convex surface and the rear concave surface of the pipe buried in inhomogeneous ground are different depending on the permittivity contrast between the inside and outside of the pipe.

Key words: Continuous Random Media(CRM), Finite-Difference Time-Domain(FDTD) Method, Ground-Penetrating Radar(GPR), Inhomogeneous Ground, Nonmetallic Pipe

#### I. 서 론

우리의 일상생활에서 사용하는 상수, 온수, 도시가스 등은 주로 공급원과 사용처에 이르는 지하에 매설된 관

로를 통해서 전달한다. 노후관을 교체하거나 신규로 매설할 경우에 지하를 굴착하는 과정에서 기존의 관로를 잘못 건드려서 손상시키게 되면 자원 손실뿐만 아니라, 누수/누출로 인하여 인명과 재산 피해가 발생하기도 한다<sup>[1]</sup>.

「이 논문은 2018학년도 제주대학교 교원성과지원사업에 의하여 연구되었음.」

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

· Manuscript received February 14, 2019 ; Revised April 15, 2019 ; Accepted April 18, 2019. (ID No. 20190214-023)

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

따라서 기존에 매설되어 있는 관로들의 위치와 종류를 미리 파악하는 것이 매우 중요하다. 최근 지표면에서 비파괴적인 방법으로 지하의 상태를 알아낼 수 있는 지표투과레이다(ground-penetrating radar: GPR)를 이용하여 지하 매설물 탐지에 널리 활용하고 있다<sup>[2]</sup>. 과거에는 주로 주철(cast iron) 계열의 금속관을 매설하였으나, 주철관은 소재 특성상 무겁고, 부식으로 인한 노후화를 막으려면 주기적으로 교체 공사를 해야 한다. 요즘에는 주철관의 단점을 보완한 고강도 플라스틱 계열의 비금속관으로 대체되고 있는 추세이다. 금속관은 전자기파의 관점에서 도전율이 매우 큰 도체처럼 작용하기 때문에 국부적인 영역에 존재하는 금속관에 의한 GPR 신호의 쌍곡선 패턴(hyperbolic pattern)을 이용하여 탐지할 수 있다<sup>[2],[3]</sup>. 이와는 달리, 비금속관은 관 내부에 채워진 물질과 외부를 둘러싸고 있는 지하매질 사이의 전기적 특성 차이에 따라 GPR 신호가 달라지는데, 비금속관의 외부의 전방 볼록면과 내부의 후방 오목면에 의한 두 반사파들의 도달시간과 극성차이를 이용하면 비금속관의 탐지가 가능함을 참고문헌 [4]에서 수치모의계산을 통해서 제시되었으나, 지하매질 분포가 균일한 경우에 대해서만 다루고 있다. 실제 대부분의 지하는 균일한 경우보다 비균일 분포를 갖는 경우에 대부분이다<sup>[2]</sup>. 비균일 지하에 매설된 금속관의 GPR 신호 특성은 참고문헌 [5]에서 수치모의계산 방법을 이용하여 지하의 비균일 정도가 심해질수록 금속관에 의한 쌍곡선 패턴의 모양, 강도, 도달시간의 왜곡이 증가하여 금속관 탐지의 정확성이 떨어질 수 있음이 제시된 바 있다. 실제 야외 실무현장의 비균일 지하에 매설된 비금속관은 GPR로 탐지하기 어렵다는 정도로만 알려져 있다. 따라서 비균일 지하에 묻혀있는 비금속관의 GPR 신호에 관한 연구가 필요하다.

최근 컴퓨터 계산기술의 발전으로 각광받고 있는 수치모의계산기법은 GPR 시스템, 지하매질과 표적의 전기적 특성을 등가 모델링하고, 컴퓨터 계산으로 맥스웰 방정식 또는 파동방정식을 풀면 전자기파의 복사, 전파, 산란 등의 현상을 포함한 광대역 GPR 신호의 특성을 해석할 수 있다. 대표적인 전자파 수치 모의계산 방법으로는 모멘트법(method of moment: MoM), 유한요소법(finite element method: FEM), 유한차분시간영역(finite-difference time-domain:

FDTD)법 등이 있다. MoM과 FEM은 주파수영역 해석기법으로서 광대역 특성을 알아내려면 주파수별로 모의계산을 수행해야 하므로, 계산시간이 오래 걸린다. 반면에 FDTD법은 시간경과에 따른 한번의 모의계산만으로도 광대역 특성을 효율적으로 해석할 수 있다. 그래서 광대역 GPR 신호의 수치 모의계산에는 FDTD법을 주로 사용한다<sup>[2]</sup>.

본 논문에서는 비균일 지하에 매설된 비금속관에 의한 GPR 수신 응답 특성의 변화를 수치 모의계산으로 비교하였다. 연속 랜덤매질(continuous random media: CRM)<sup>[6],[7]</sup> 기법을 이용하여 비균일 지하의 유전율 분포를 모델링하고, 지하에 매설된 유전체 충전 비금속관의 GPR 신호를 FDTD<sup>[8]</sup>법으로 모의계산하였다. 비금속관 내부에 채워진 물질의 상대유전율의 변화에 따라 GPR 신호를 수치 모의계산한 결과의 비교를 통해서 지하의 비균일성이 비금속관 탐지를 위한 GPR 신호의 응답 특성에 미치는 영향을 분석하였다.

## II. 비균일 지하매질 생성: CRM 기법

CRM 기법<sup>[6],[7]</sup>에 의하면 2차원 직각좌표계( $x, y$ )에서 비균일 지하매질의 상대유전율  $\epsilon_r(x, y)$ 는 균일성분(homogeneous component)  $\epsilon_m$ 을 중심으로 랜덤 변동 성분(random fluctuation component)  $\Delta\epsilon_f(x, y)$ 가 다음과 같은 중첩된 것으로 모델링할 수 있다.

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

$$f(x, y) = \Delta\epsilon_f(x, y) / \epsilon_m \quad (2)$$

여기서  $f(x, y)$ 는  $\epsilon_m$ 을 기준으로  $\Delta\epsilon_f(x, y)$ 의 상대적인 변동 비율에 해당하는 2차원 공간함수이다. 공간에 대한  $f(x, y)$ 의 평균과 분산은 각각 다음과 같다.

$$\langle f(x, y) \rangle = 0 \quad (3)$$

$$\langle f^2(x, y) \rangle = h^2 \quad (4)$$

여기서  $\langle \dots \rangle$ 는 공간에 대한 평균을 취하는 연산자이다. 식 (1)과 식 (3)에 의하면  $\epsilon_r(x, y)$ 의 평균은  $\langle \epsilon_r(x, y) \rangle = \epsilon_m$ 로서 균일매질의 상대유전율과 같아짐을 알 수 있다.

따라서  $f(x, y)$ 를 구해서 식 (1)에 대입하기만 하면 지하 매질의 상대유전율 분포  $\epsilon_r(x, y)$ 를 얻을 수 있다. 2차원 공간함수  $f(x, y)$ 는 다음과 같은 공간 스펙트럼 함수(spatial spectrum function)  $F(k_x, k_y)$ 의 역푸리에 변환(inverse Fourier transform)으로 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} F(k_x, k_y) &= |F(k_x, k_y)| e^{j\Phi(k_x, k_y)} \\ &= \sqrt{R(k_x, k_y)} e^{j\Phi(k_x, k_y)} \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)에서  $k_x$ 와  $k_y$ 는 각각  $x$ 축과  $y$ 축에 대한 파수(wavenumber)를 나타내고,  $|F(k_x, k_y)|$ 는  $F(k_x, k_y)$ 의 진폭스펙트럼으로서  $f(x, y)$ 에 대한 자기상관함수(auto-correlation function)의 푸리에 변환으로 얻은 전력스펙트럼  $R(k_x, k_y)$ 의 제곱근에 해당한다.  $\Phi(k_x, k_y)$ 는  $F(k_x, k_y)$ 의 위상스펙트럼으로서  $[0, 2\pi]$  구간에서 적절한 확률밀도함수(probability density function)를 따르는 난수(random number)를 이용하여 구할 수 있다.

본 논문에서는 지구통계학(geostatistics)<sup>[7]</sup>에서 주로 사용하는 가우시안 분포(Gaussian distribution)를 따르는 자기상관함수와 확률밀도함수를 도입하였다. 2차원 공간에 대한 가우시안 자기상관함수의 전력스펙트럼  $R(k_x, k_y)$ 은 다음과 같다<sup>[7]</sup>.

$$R(k_x, k_y) = h^2 l_c^2 \pi e^{-(k_x^2 + k_y^2) l_c^2 / 4} \quad (6)$$

여기서,  $h$ 는 평균을 중심으로 약 68.27 %의 빈도에 해당하는 랜덤 변동 범위를 나타내는 표준편차(standard deviation)이고,  $l_c$ 는  $x$ 축과  $y$ 축 방향을 따라 랜덤 변동 성분의 상관관계(correlation)가 1부터  $e^{-1} \cong 0.368$ 까지 작용하는 상관길이(correlation length)이다. 식 (1)~식 (6)에서  $h = 0$ 이면 랜덤 변동 성분  $\Delta\epsilon_f(x, y) = 0$ 이 되어 지하는  $\epsilon_r(x, y) = \epsilon_m$ 인 상대유전율을 갖는 균일매질이 된다. 이와는 달리,  $h \neq 0$ 이면  $l_c$ 에 대응하는 공간적인 상관관계를 갖게 되어 균일 성분  $\epsilon_m$ 을 중심으로 랜덤 변동 성분  $\Delta\epsilon_f(x, y) \neq 0$ 인 비균일 매질 분포  $\epsilon_r(x, y)$ 가 생성된다. 따라서 CRM 기법은 지하의 상대유전율에 대한 평균  $\epsilon_m$ , 표준편차  $h$ , 상관거리  $l_c$ 만으로 균일과 비균일 매질 분포를 모두 모델링할 수 있다.

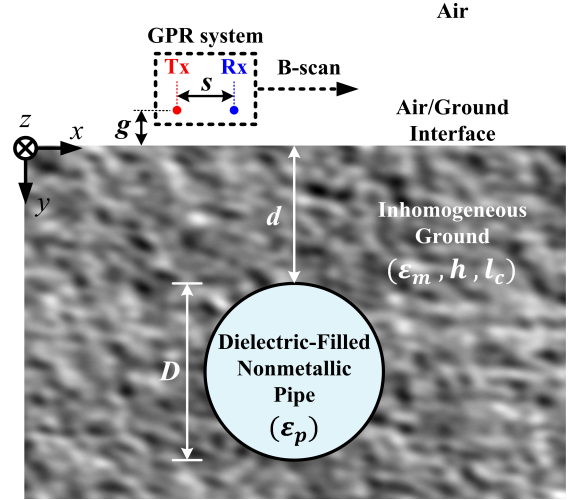
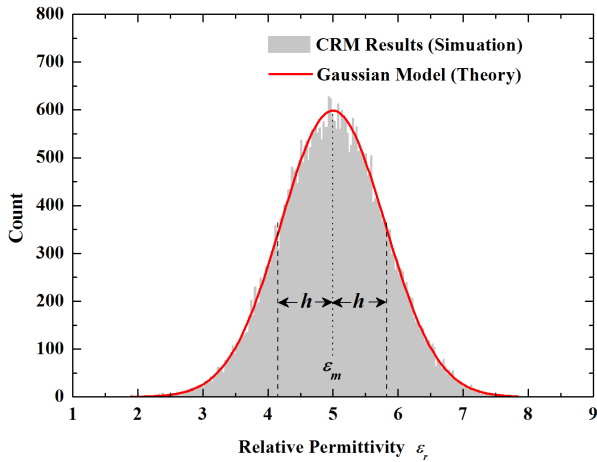


그림 1. GPR 문제 상황  
Fig. 1. Situation of a GPR problem.

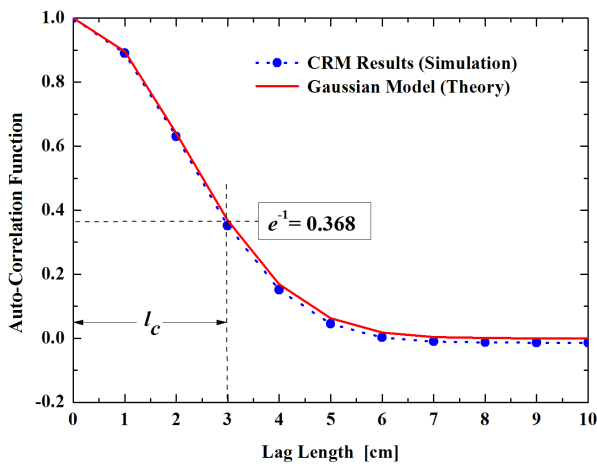
### III. GPR 신호의 수치 모의계산 결과의 비교

본 논문에서 다루는 GPR 문제 상황은 그림 1처럼 비균일 지하( $\epsilon_m, h, l_c$ )에 유전체( $\epsilon_p$ )로 채운 비금속관이 매설되어 있는 경우이다. II절에서 다룬 CRM 기법인 식 (1)~식 (6)에  $\epsilon_m=5, h=0.8, l_c=3$  cm를 대입하여  $\epsilon_m=5$ 인 균일 분포를 중심으로 랜덤 변동하는 비균일 지하매질의 상대유전율 분포  $\epsilon_r(x, y)$ 를 얻을 수 있었다. 생성한 비균일 지하매질의 상대유전율 분포로부터 히스토그램(histogram)과 자기상관함수를 계산한 결과, 그림 2와 같이 모두 가우시안 분포를 따르고 있으며, 모의계산과 이론값이 거의 일치함을 확인할 수 있었다. 비균일 지하매질 속에 지름  $D=20$  cm인 비금속관이 지표면으로부터 깊이  $d=0.5$  m에 매설되어 있고, 비금속관 내부는 상대유전율  $\epsilon_p$ 인 유전체로 가득 채워져 있는 경우로 가정하였다. GPR 시스템의 송신 신호는 시간영역에서 미분형 가우시안 파형(differential Gaussian waveform)으로서 250 MHz에서 최대 진폭을 갖고 있으며, 최대 진폭의 10 %에 해당하는 주파수 범위는 20 MHz~700 MHz인 광대역 펄스이다. FDTD 모의계산의 공간 영역은 최소 파장에 대해서 약 15분의 1에 해당하는 공간 간격인  $\Delta x = \Delta y = 1$  cm를 갖는 정사각형 셀로 모델링하였고, 시간영역은 CFL(Courant-Friedrich-Lewy) 안정조건<sup>[8]</sup> 내에서 시간간격  $\Delta t=16.7$  ps로 최대 3,000개

의 시점으로 구성하였다. GPR 시스템은 송수신 안테나 사이의 거리가  $s=10$  cm, 지표면으로부터 높이  $g=2$  cm에서 지표면을 따라  $x$ 축 방향으로 10 cm 간격으로 이동하면서 31개 지점에서 수신한 A-scan 자료를 이용하여 수평 이동거리와 지연시간을 두 축으로 하는 B-scan 자료를 구성하였다.



(a) 히스토그램  
(a) Histogram



(b) 자기상관함수  
(b) Auto-correlation function

그림 2. CRM 기법으로 생성한 비균일 지하매질의 상대 유전율 분포의 검증( $\epsilon_m=5$ ,  $h=0.8$ ,  $l_c=3$  cm)

Fig. 2. Validation of relative permittivity distribution of inhomogeneous ground media generated by the CRM technique ( $\epsilon_m=5$ ,  $h=0.8$ ,  $l_c=3$  cm).

비균일 지하매질 속에 매설되어 있는 비금속관의 내부를 채우고 있는 물질의 상대유전율( $\epsilon_p=1\sim10$ )의 변화에 따른 GPR 수신신호의 B-scan 영상을 비교해 보면 그림 3과 같다. 그림 3에서 지연시간이 약 3 ns 부근에서 수평 일직선으로 나타난 패턴은 GPR 시스템의 송수신안테나와 수신안테나의 인접효과에 의한 직접결합(direct coupling) 성분이다. 3 ns 이후의 모든 위치에서 검정색, 흰색, 회색 등의 알갱이처럼 보이는 것은 지하의 비균일성에 의한 클러터(clutter) 성분이다. 우선 비균일 지하매질의 평균 상대유전율( $\epsilon_m$ )보다 낮은 상대유전율( $\epsilon_p < \epsilon_m$ )을 갖는 유전체로 채워진 비금속관이 매설된 경우의 B-scan 영상은 그림 3(a)~그림 3(c)와 같다. 그림 3(a)와 그림 3(b)에서 볼 수 있는 것처럼 지연시간이 약 11 ns 근방에서 정점을 갖는 쌍곡선 패턴을 볼 수 있는데, 이는 비금속관의 전방 블록면에 의한 정반사(specular reflection) 성분이다. 그런데, 그림 3(a)에서 그림 3(c)로 갈수록 비금속관의 전방의 정반사에 해당하는 쌍곡선 패턴의 강도가 점점 약해져서 구분해내기 어려워지는 것을 볼 수 있다. 그 이유는 비금속관 내부를 채우고 있는 물질의 상대유전율  $\epsilon_p$ 가 외부를 둘러싸고 있는 비균일 지하매질의 평균 상대유전율  $\epsilon_m$ 에 근접하게 하게 되면 비금속관 전방에 의한 정반사 성분이 지하의 비균일성에 의한 클러터 성분보다 강도가 낮아지기 때문에 상대적으로 지하 클러터 성분의 영향이 커진 것으로 작용하기 때문이다. 이번에는 비균일 지하매질의 평균 상대유전율( $\epsilon_m$ )보다 높은 상대유전율( $\epsilon_p > \epsilon_m$ )을 갖는 유전체로 채워진 비금속관이 매설된 경우에 대한 B-scan 영상은 그림 3(d)~그림 3(f)와 같다. 그림 3(e)와 그림 3(f)에 의하면 지연시간이 약 15 ns에서 정점을 갖는 쌍곡선 패턴을 볼 수 있는데, 이는 비금속관 내부의 후방 오목면에 의한 축반사(axial reflection) 성분에 의해 발생한 것이다. 비금속관 전방에 의한 정반사 성분에 의한 쌍곡선 패턴은 지하의 비균일성에 의한 클러터 성분보다 강도가 약하기 때문에 상대적으로 클러터에 가려져서 없는 것처럼 보이는 것이고, 비금속관 내부를 채운 물질과 관 외부를 둘러싸고 있는 지하매질의 유전율 차이가 증가함에 따라 비금속관 하단의 오목면에 의한 축반사 성분의 강도가 클러터 성분보다 높아져서 쌍곡선 패턴이 좀 더 뚜렷해지는 것을 볼 수 있다. 실제 야외현장

비균일 지하에 묻혀있는 유전체 충전 비금속관에 의한 지표투과레이다 응답의 특성 변화

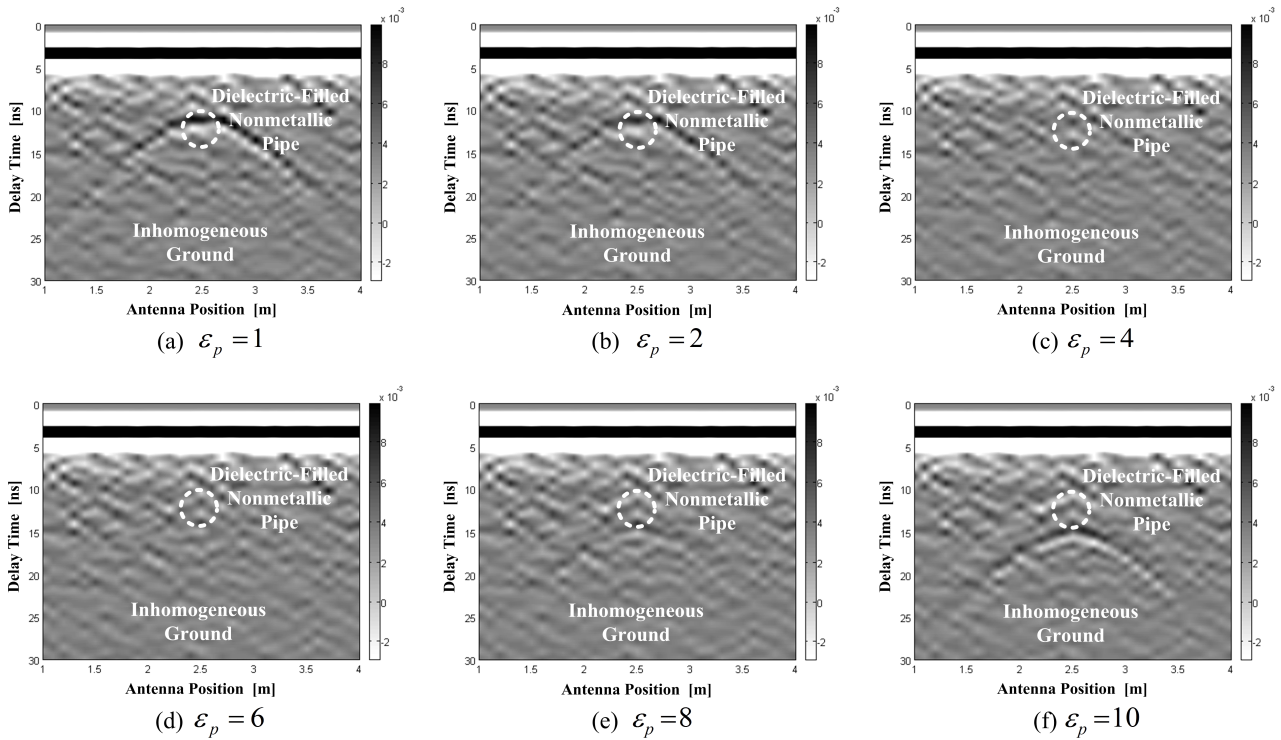


그림 3. 비균일 지하( $\epsilon_m=5$ ,  $h=0.8$ ,  $l_c=3$  cm)에 매설된 비금속관 내부의 유전체 충전( $\epsilon_p=1\sim10$ )의 함수로 B-scan 영상 비교  
Fig. 3. Comparison of B-scan images as a function of dielectric filling( $\epsilon_p=1\sim10$ ) within nonmetallic pipes buried in inhomogeneous ground( $\epsilon_m=5$ ,  $h=0.8$ ,  $l_c=3$  cm).

GPR 탐사에서 지하의 매설상태에 대한 사전정보가 전혀 없는 경우가 대부분이므로, 그림 3(e) 또는 그림 3(f) 자체만을 보게 되면 마치 15 ns 근방에 정점을 갖는 단일 쌍곡선 패턴만 존재하는 것처럼 보이기 때문에 이를 매설관의 전방 블록면으로 착각할 가능성이 있다. 그래서 B-scan 영상뿐만 아니라, 쌍곡선의 정점에 해당하는 GPR 안테나의 위치에서 획득한 A-scan 자료를 추가적으로 확인할 필요가 있다. GPR 송수신안테나가 비금속관의 상단에 해당하는 지표면 상의 한 지점에 위치하고 있는 경우에 지하 매질이 A-scan 자료를 비교하면 그림 4와 같다. 그림 4의 모든 A-scan 자료는 송신안테나와 수신안테나 사이의 직접결합 성분을 배경제거 필터링(background removal filtering)<sup>[2]</sup>한 후 지하매질이 균일 및 비균일한 경우에 매설된 비금속관의 존재 유무에 따라 나타난 것이다. 그림 4에서 실선(—)은 균일한 지하매질 속에 비금속관이 매설된 경우이고, 점선(···)은 비균일 지하매질에 비금속관이

존재하는 경우이며, 파선(---)은 비금속관이 매설되지 않은 비균일 지하매질만 있는 상태로서 지하의 비균일성 클러스터 성분만 존재하는 경우의 A-scan 자료를 수치 모의계산한 결과이다. 그림 4(a)와 그림 4(b)처럼 비균일 지하에 매설된 비금속관 내부를 채우고 있는 물질의 상대유전율이 각각  $\epsilon_p=1, 2$ 인 경우에는 GPR 수신신호는 11 ns 부근에서 지하의 비균일 클러스터 성분보다 높은 강도로 비금속관 전방 블록면에 의한 정반사 신호가 수신되었다. 그림 4(c)와 그림 4(d)에서 볼 수 있는 바와 같이, 비금속관 내부를 채우고 있는 유전체가 외부를 둘러싸고 있는 지하 매질의 상대유전율로부터  $\pm 1$ 이내의 작은 차이인 경우에는 A-scan 자료에서 비금속관에 의한 정반사 또는 측반사 성분이 너무 작아서 지하의 비균일 클러스터 성분과 구분하기 어렵다. 이처럼 비균일 지하 클러스터 성분보다 비금속관에 의한 반사신호의 크기가 작은 경우에는 GPR 탐사로 비금속관 탐지가 거의 불가능함을 알 수 있다. 그림 4(e)와

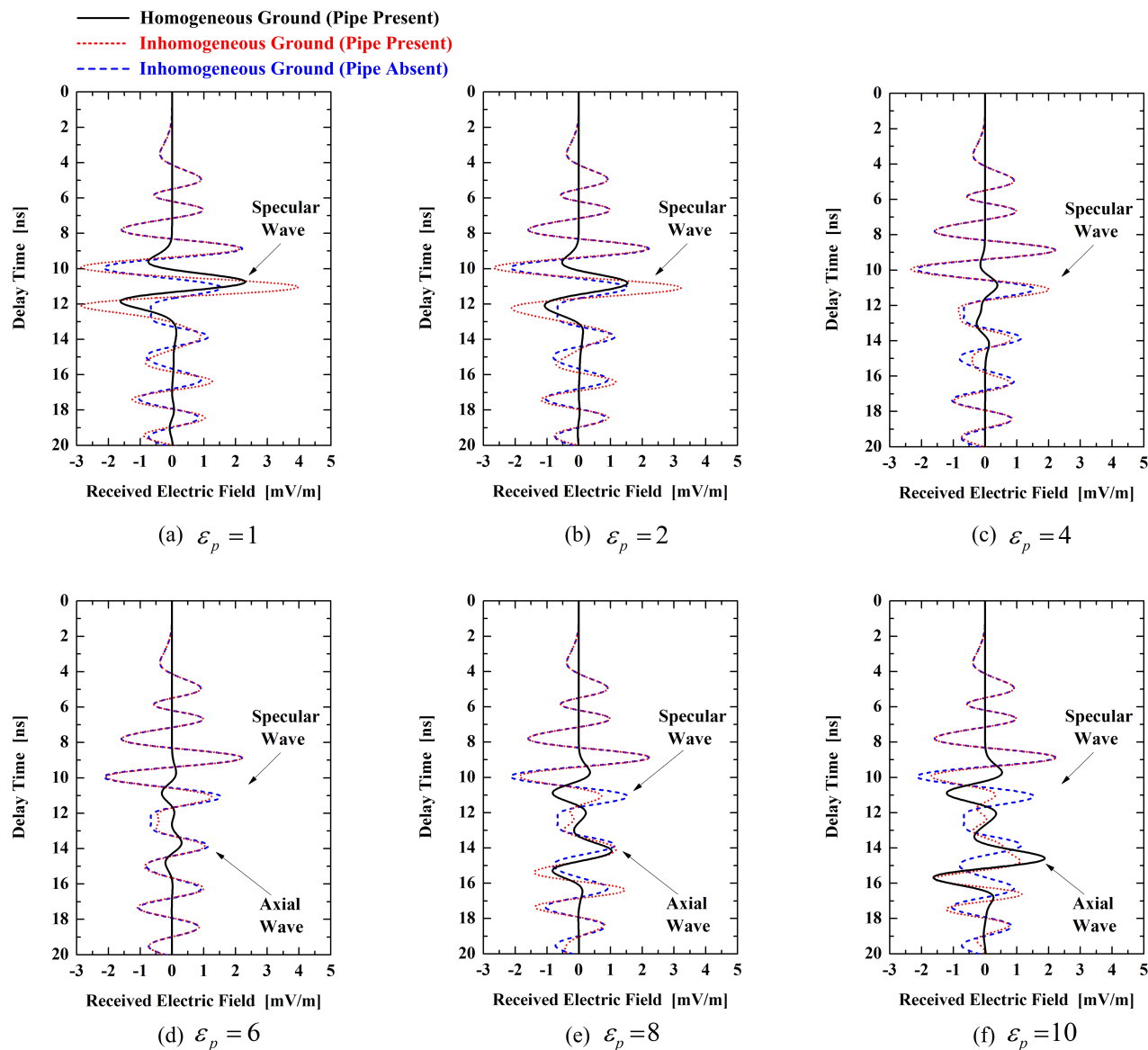


그림 4. 균일( $\epsilon_m=5$ ,  $h=0$ ) 및 비균일( $\epsilon_m=5$ ,  $h=0.8$ ,  $l_c=3$  cm) 지하에 매설된 비금속관 내부의 유전체 충전( $\epsilon_p=1\sim10$ )에 따른 A-scan 자료 비교

Fig. 4. Comparison of A-scan data as a function of dielectric filling( $\epsilon_p=1\sim10$ ) within a nonmetallic pipe buried in homogeneous( $\epsilon_m=5$ ,  $h=0$ ) and inhomogeneous( $\epsilon_m=5$ ,  $h=0.8$ ,  $l_c=3$  cm) grounds.

그림 4(f)처럼 비금속관 내부와 외부를 둘러싸고 있는 비균일 지하의 평균 상대유전율의 차이가 +2 이상인 경우에 균일 지하매질에서는 비금속관의 전방 볼록면에 의한 정반사 성분과 비금속관의 후방 오목면에 의한 축반사 성분이 정반대의 극성으로 뚜렷하게 구분되는 반면에, 비

균일 지하매질에 대해서는 비금속관의 정반사 성분은 지하의 비균일 클러터에 의해 가려져서 구분되지 않았지만, 비금속관의 축반사 성분은 지하의 비균일 클러터보다 높게 나타났다. 따라서 비균일 지하매질에서는 비금속관의 내부를 채우고 있는 물질과 외부에 둘러싸고 있는 물질



사이의 상대유전율 차이가  $\pm 2$  이상이면 비금속관에 의한 정반사 또는 측반사 신호성분을 비균일 지하에 의한 클러스터 성분과 뚜렷한 구분을 할 수 있으므로, GPR로 비금속관을 탐지할 수 있는 가능성이 높다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 비균일 지하에서 비금속관 탐지의 가능성을 조사하기 위해서 비균일 지하에 매설되어 있는 비금속관 내부의 충전 물질에 따른 GPR 수신응답 특성의 변화 양상을 수치모의계산으로 비교하였다. 비금속관 내부를 채우고 있는 물질의 상대유전율의 변화에 따라 지하의 비균일성이 비금속관의 전방 블록면의 정반사 신호뿐만 아니라, 후방 오목면의 측반사 신호에 미치는 왜곡 특성이 서로 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 비금속관 내부를 채우고 있는 물질이 비금속관 외부를 둘러싸고 있는 지하매질의 평균 유전율보다 낮은 경우에는 비금속관의 전방 블록면에 의한 정반사가 GPR 신호의 주 성분이 되고, 비금속관 내부가 외부의 지하매질의 평균 유전율보다 높은 경우에는 비금속관의 전방 블록면에 의한 정반사보다 후방 오목면에 의한 측반사가 주된 성분으로 작용하였다. 특히 비균일 지하에서 비금속관 내부를 채우고 있는 물질과 비금속관 외부를 둘러싸고 있는 비균일 지하매질 사이의 상대유전율 차이가 최소한  $\pm 2$  이상이면 비금속관의 정반사 또는 측반사 신호 성분이 지하의 비균일성에 의한 클러스터 성분보다 높은 강도로 수신되어 GPR로 비금속관 탐지의 가능성이 높아졌다. 이와는 달리 비금속관 내부와 외부 사이의 상대유전율 차이가  $\pm 1$  이내로 작을 경우에는 비금속관에 의한 정반사뿐만 아니라, 측반사 성분도 지하의 비균일 클러스터에 비해서 너무 작은 강도로 수신되기 때문에 비금속관의 반사신호는 지하의 비균일 클러스터의 영향에 가려져서 GPR 탐사에서 비금속관을 탐지할 수 있는 가능성이 매우 희박함을 알 수 있었다. 향후 본 논문에서 제시한 방법과 결과를 활용하여

지하의 비균일성에 의한 클러스터 성분을 효과적으로 저감시키면서 동시에 비금속관에 의한 정반사와 측반사 성분을 강화시킬 수 있는 GPR 시스템의 최적 설계 및 운용 방법, 신호처리 기법을 개발한다면 실제 비균일 지하에 묻혀있는 비금속관의 탐지율을 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다.

#### References

- [1] 감사원, 지하매설물 안전관리 실태, 특정감사 결과보고서, 2018년 8월.
- [2] D. J. Daniel, *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] 현승엽, "지하 매설관 탐지를 위한 지하탐사레이더 신호의 특성에 관한 연구," 한국전자과학회논문지, 28(1), pp. 42-48, 2017년 1월.
- [5] 현승엽, "비균일 지하에 매설된 금속관 탐지를 위한 지하탐사레이더 신호의 수치 모의계산," 한국전자과학회논문지, 29(1), pp. 61-67, 2018년 1월.
- [6] 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.
- [7] L. Klimes, "Correlation functions of random media," *Pure and Applied Geophysics*, vol. 159, no. 7-8, pp. 1811-1831, Jul. 2002.
- [8] A. Taflov, S. C. Hagness, *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method*, 3rd ed. Boston, MA, Artech House, 2005.

현 승 업 [제주대학교/부교수]

<https://orcid.org/0000-0003-4517-0436>



1997년 2월: 제주대학교 통신공학과 (공학사)

1999년 2월: 고려대학교 전파공학과 (공학석사)

2008년 8월: 고려대학교 전파공학과 (공학박사)

1997년 3월~2008년 8월: 한국과학기술연구원 영상미디어연구센터 학생연구원

2001년 5월~2003년 10월: (주)에스지테크놀로지 부설연구소 주임연구원

2003년 11월~2006년 2월: LG전자(주) 디지털어플라이언스연구소 선임연구원

2009년 7월~2011년 6월: (주)이성엔지니어링 부설연구소 책임연구원

2008년 9월~2012년 2월: 한국과학기술연구원 영상미디어연구센터 Post-doctor

2012년 3월~현재: 제주대학교 전기전자통신컴퓨터공학부 부교수

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