

지하 매설관 탐지를 위한 지하탐사레이다 신호의 특성에 관한 연구

A Study on Characteristics of Ground-Penetrating Radar Signals for Detection of Buried Pipes

현 승 엽

Seung-Yeup Hyun

요 약

지하에 매설된 관을 탐지하기 위해 지하탐사레이다(GPR) 신호의 특성을 수치해석으로 조사하였다. GPR 시스템의 송수신부, 지하매질, 유전체로 채워진 플라스틱 관을 시간영역유한차분법(FDTD)으로 모델링하였다. GPR 신호의 양상을 관찰하기 위해서 관의 지름과 관 속에 채워진 물질의 유전율 변화에 따른 FDTD 모의계산을 수행하였다. 유전체로 채워진 플라스틱 관에 의해 산란된 GPR 신호는 관 외부의 전방 볼록면 반사파와 관 내부의 후방 오목면 반사파의 중첩으로 나타났다. 두 파의 진폭, 극성, 지연시간은 플라스틱 관 사이즈와 관 내부 충전 물질의 유전율에 종속되어 있음을 알 수 있었다.

Abstract

Characteristics of ground-penetrating radar(GPR) signals for detecting buried pipes are investigated numerically. Transmitting and receiving parts of a GPR system, a subsurface soil and a plastic pipe filled with a dielectric material are modeled by using the finite-difference time-domain(FDTD) method. FDTD simulations for observing aspects of GPR signals are performed as a function of the diameter of the pipe and the permittivity of the filling material in the pipe. GPR signals scattered by a dielectric filled pipe appear as a superposition of two waves, such as the specular wave from the front convex surface of the pipe and the axial wave from the rear concave surface of the pipe. We show that the amplitude, the polarity, the delay time of two waves depend on the size of the pipe and the permittivity of the filling material in the pipe.

Key words: Buried Pipe, Finite-Difference Time-Domain Method, Ground-Penetrating Radar

I. 서 론

최근 정부와 지방자치단체에서는 지하공간의 효과적인 관리를 위해서 상하수도관, 가스관 등의 매설 정보를 포함하는 GIS(Geographic Information System) 구축 사업을 진행하고 있다^[1]. 신규 매설관의 재질, 지름, 깊이, 경로

등에 대한 매설정보는 토목공학의 측량법으로 체계적으로 관리하고 있다. 그러나, 기존에 매설된 관은 정보가 없는 경우가 대부분이다. 매설정보가 없는 노후 상하수도관이 손상된 경우에는 수자원 손실과 환경오염을 비롯하여 심각한 경우에는 도로 하부의 갑작스런 함몰로 인한 싱크홀(sinkhole)의 발생으로 확대되기도 한다. 또한, 도로나

「이 논문은 2016학년도 제주대학교 교원성과지원사업에 의하여 연구되었음.」

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

· Manuscript received October 11, 2016 ; Revised November 22, 2016 ; Accepted December 5, 2016. (ID No. 20161011-011S)

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

지하철 공사 중에 지하를 파헤치다가 인접한 가스관을 잘 못 건드려서 폭발사고가 발생하기도 한다. 따라서, 지하를 직접 파헤치지 않고서도 지상에서 비파괴적인 방법으로 매설관의 정보를 얻을 수 있는 방법이 필요하다.

국내의 지하매설물탐사업체에서는 주로 금속관 탐지기(MPL: Metal Pipe Locator)를 이용하여 금속관의 매설 위치와 경로를 알아낸다. 금속관 탐지기는 금속이 존재하면 전자기 유도(electromagnetic induction)에 의해 자계(magnetic field) 패턴이 교란되는 특성을 이용한 방법이다. MPL은 인접한 모든 금속에 대해 반응하기 때문에 금속관 이외의 주변 금속 물체를 구분하지 못한다. 또한, 비금속성분에 대해서는 전혀 반응하지 않기 때문에 비금속관의 탐지는 불가능하다. 이와는 달리, 지하탐사레이다(GPR: Ground-Penetrating Radar)^{[2],[3]}는 전자기파 신호를 광대역 안테나를 통해서 지하로 송신하고, 지하로부터 되돌아온 신호를 수신 및 분석하여 지하표적의 위치, 모양, 구성성분 등에 대한 정보를 알아내는 방법이다. GPR의 전자기파 신호는 금속관과 비금속관 모두에 대해 반응한다. 금속관에 대한 GPR 신호의 강도는 비교적 높아서 탐지하기 용이한 편이다. 그러나, 비금속관은 내부에 채워진 매질과 관 주변을 둘러싸고 있는 지하 배경매질의 특성에 따라 탐지 가능성이 크게 좌우된다. GPR에 관한 국내의 주요 연구동향을 살펴보면 목조 건축물의 비파괴 검사^[4], 상수도관의 누수 탐지^[5], 지하 비균일 클러스터의 영향 분석 및 신호처리^[6], 지뢰 탐지^[7], 금속 매설관 및 관 주변에 발생한 공동 탐지^[8] 등 많은 연구가 진행되었다. 그러나, GPR을 이용한 비금속관 탐지에 관한 연구는 미흡하다. 최근 상수도 및 가스관은 비금속인 플라스틱관으로 대체되고 있는 추세이다. 그러므로, GPR을 이용한 비금속관 탐지의 가능성에 관한 연구가 필요하다.

본 논문은 지하에 매설된 플라스틱관의 지름과 관 속에 채워진 물질의 유전율에 따른 GPR 신호의 변화양상을 전자파 수치해석으로 조사하고, 신호의 주요 특성을 분석하였다. GPR 신호에서 플라스틱 매설관 외부의 전방 블록면과 관 내부의 후방 오목면에 의한 산란파의 진폭, 극성, 지연시간의 차이는 관의 지름과 관 속에 채워진 물질의 유전율과 상호 연관성이 있음을 제시하였다.

II. GPR 신호의 FDTD 모의계산

GPR에 대한 연구 방법은 크게 실험과 수치해석으로 나뉜다. 첫 번째로, GPR 실험은 실제 지하의 특성을 직접 고려할 수 있는 장점이 있으나, 지하환경은 토양의 종류, 날씨 변화에 의한 수분함량 변화 등과 같은 많은 변수를 포함하고 있어서 신호분석이 매우 어렵다. 두 번째로, 수치해석은 전자기파에 대한 파동방정식 또는 맥스웰 방정식을 이용하여 GPR 시스템, 지하매질, 매설표적을 각각 등가로 모델링하여 모의계산하는 방법이다. 대표적인 수치해석기법으로는 주파수 영역기법과 시간 영역기법이 있다. 주파수 영역기법으로는 모멘트법(MoM: Method of Moment), 유한요소법(FEM: Finite Element Method) 등이 있다. 주파수마다 높은 정확성을 얻을 수 있는 장점이 있으나, GPR처럼 광대역 신호의 송수신 특성을 해석하기 위해서는 여러 주파수 각각에 대해서 동일한 공간에 반복적으로 계산해야 하므로, 계산시간이 오래 걸리는 단점이 있다. 이와는 달리, 시간-공간 영역 상의 맥스웰 방정식을 유한차분 근사로 전자파 수치해석을 수행하는 시간영역유한차분(FDTD, finite-difference time-domain)^[9]법은 한 번의 모의계산으로 광대역 특성을 알아낼 수 있어서 매우 효율적이다. 그래서, 본 논문에서는 GPR 신호의 수치해석을 위해서 FDTD 법을 도입하였다.

GPR 문제 상황은 그림 1과 같이 지하에 유전체로 채워진 플라스틱관이 매설되어 있을 경우로 가정하였다. GPR을 지표면을 따라 수평방향으로 이동시키면서 지하로 시간적으로 매우 좁은 펄스 신호를 보내고, 매설관에 의한 산란파를 수신한다. 그림 1에서 $\epsilon_{r,s}$ 는 지하 배경매질의 상대유전율이고, $\epsilon_{r,p}$ 는 플라스틱 관 속에 채워 넣은 유전체의 상대유전율이다. 관의 지름은 D 이고, 지표면으로부터 관의 매설깊이는 d 이다. 지하에 매설된 관은 균일 단면이고, 관의 축 방향으로 충분히 길다. 또한, GPR 안테나의 편파방향이 매설관의 축 방향과 나란하고, 안테나의 광대역 특성이 매우 우수한 경우에는 2차원 FDTD로 근사하여 모델링할 수 있다. 일반적으로 GPR 안테나는 축 방향으로 저항성 장하(resistive loading) 분포를 갖는 유한길이의 다이폴(finite dipole) 안테나를 주로 사용한다^{[2],[3]}. 이는 마치 축 방향으로 무한길이를 갖는 다이폴(infinite

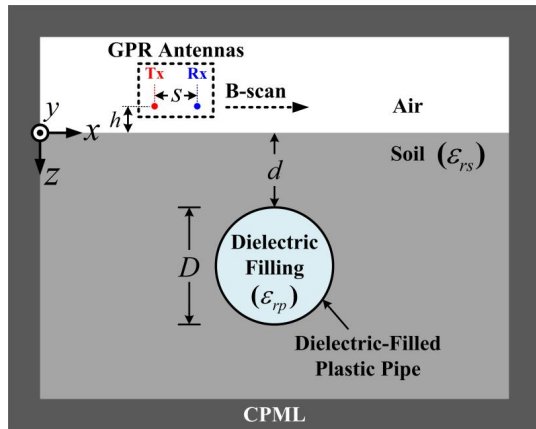


그림 1. 매설관 탐지를 위한 GPR 탐사의 FDTD 모의계산 영역

Fig. 1. FDTD simulation region of GPR survey for detecting a buried pipe.

dipole) 안테나와 유사한 역할을 한다. 따라서, 2차원 FDTD 상에서는 안테나의 3차원 구조를 직접 모델링하는 대신에 y 축 방향으로 선형편파를 갖는 무한길이의 다이폴 안테나를 전계 E_y 성분으로 모델링하였다. 그래서, 그림 1에서 GPR의 송수신 안테나는 두 개의 전계 E_y 성분에 대해서 x 축 방향으로 서로 s 만큼 떨어져 있고, 지표면으로부터 h 위치한 것으로 고려하였다. FDTD 영역의 최외각 경계에서 전자기파의 무반사와 충분한 흡수를 위해서 6층으로 구성된 CPML(Convolution Perfectly Matched Layer)^[10]로 종단시켰다.

송신 신호는 그림 2와 같이 주파수 성분이 약 250 MHz에서 최대인 시간영역 미분형 가우시안 펄스(time-domain differential Gaussian pulse) 파형을 인가하였다. 일반적으로 가우시안 펄스신호에서 의미 있는 주파수 성분은 첨두치(peak)의 약 10 %까지 유효하므로, 그림 2와 같은 신호의 최대주파수는 약 700 MHz에 해당한다. 그래서, FDTD 계산영역은 $\epsilon_{rs}=5$ 인 지하 배경매질을 기준으로 약 19분의 1파장에 해당하는 공간간격인 $\Delta x=\Delta z=1$ cm를 갖는 정사각형 격자로 구성하였다. 따라서, 매설관의 원형 단면은 계단형 근사(staircase approximation)로 모델링하였다. 시간간격은 CFL(Courant-Friedrich-Lewy) 안정조건^[9]을 만족하는 $\Delta t=16.7$ ps로 선정하였다. 송수신안테나의 간격 $s=10$ cm이고, 지표면으로부터 $h=2$ cm 높이에

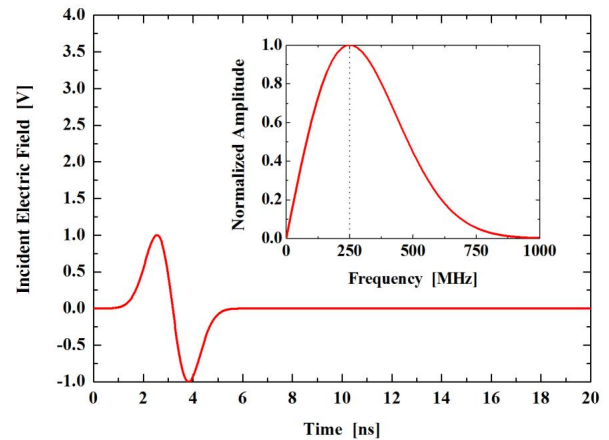


그림 2. 송신신호의 파형

Fig. 2. Waveform of a transmitting signal.

서 x 축 방향으로 1 m에서 4 m까지 10 cm마다 31개의 지점에서 A-scan 탐사자료를 FDTD 모의계산으로 획득하고, 이로부터 하나의 B-scan 탐사자료를 구성하였다.

첫 번째 비교 상황은 $\epsilon_{rs}=5$ 인 지하매질 속에 공기($\epsilon_{rp}=1$)로 채워진 플라스틱 관이 지표면으로부터 $d=0.5$ m 깊이에 지름이 각각 $D=20, 40, 60$ cm로 매설한 경우이다. FDTD 모의계산으로 획득한 GPR의 B-scan 탐사자료를 그레이 스케일(gray-scale display) 영상으로 나타내면 그림 3과 같다. 그림 3에서 시간이 1~5 ns 부근에 일정하게 보이는 수평선 패턴은 송신안테나에서 수신안테나로 직접 결합(direct coupling) 성분과 지표면 반사가 중첩된 것이다. 약 10 ns에서 정점을 갖는 쌍곡선 패턴(hyperbolic pattern)은 관 상단의 볼록면에 의한 초기 반사파(specular wave)^[11]이다. 관의 지름이 증가할수록 관 하단의 오목면에 의한 축방향 반사파(axial wave)^[11]가 초기 반사파로부터 지연된 시간에 나타났다. 그림 3에서 송수신안테나의 중심 위치가 $x=2.5$ m인 경우에 불필요한 직접결합과 지표면 반사 성분은 제거하고, 매설관에 의한 산란파만을 추출하여 비교해 보면 그림 4와 같다. 그림 4에서 $D=20$ cm인 경우에는 초기 반사파와 축방향 반사파는 거의 비슷한 시간에 겹쳐서 구분하기는 어렵다. $D=40$ cm인 경우에는 15 ns 부근에서 축방향 반사파가 일부가 시간지연되고, $D=60$ cm인 관에서는 초기 반사파와 축방향 반사파의 시간차가 증가하여 좀 더 뚜렷하게 구분되었다. 따

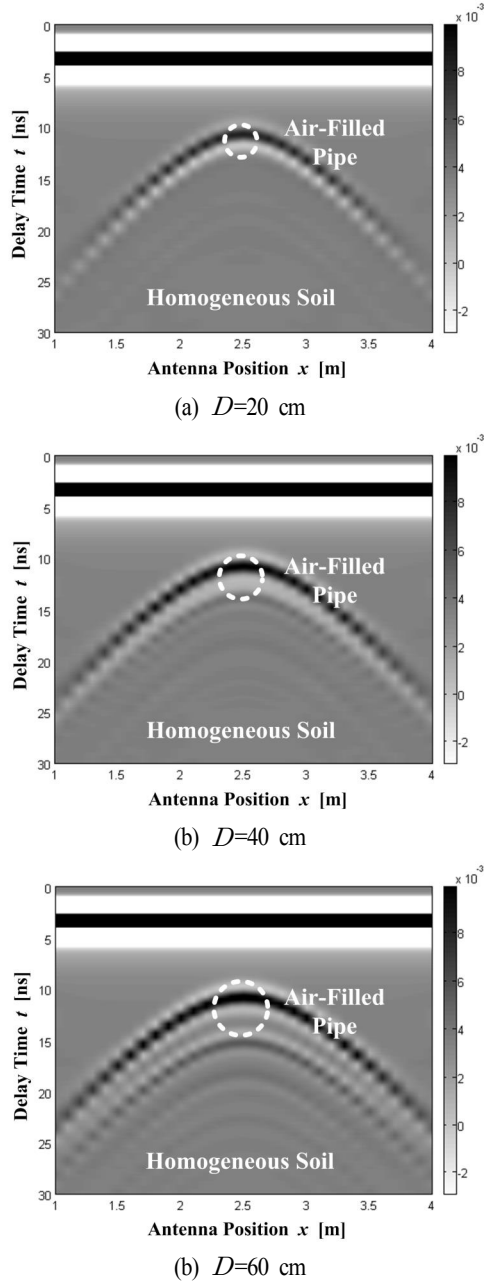


그림 3. 공기로 채워진 플라스틱 관의 지름(D)에 따른 B-scan 영상

Fig. 3. B-scan images as a function of a diameter (D) of a air-filled plastic pipe.

라서, 관의 지름이 커질수록 초기 반사파의 진폭이 커지고, 축방향 반사파와의 시간지연이 늘어난다.

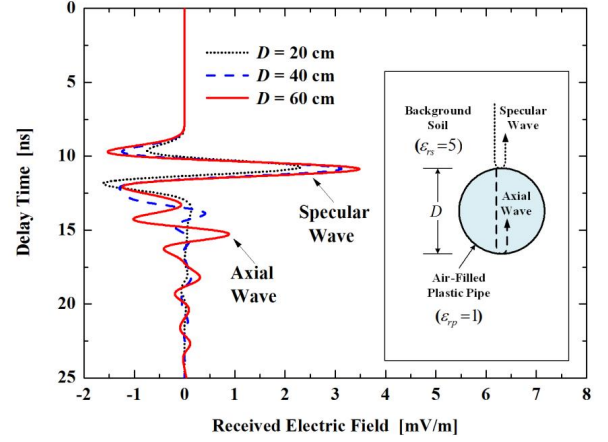
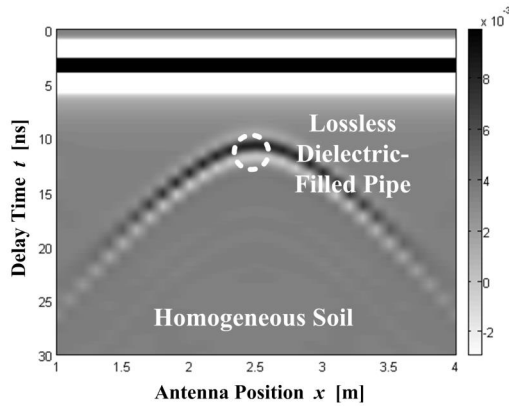


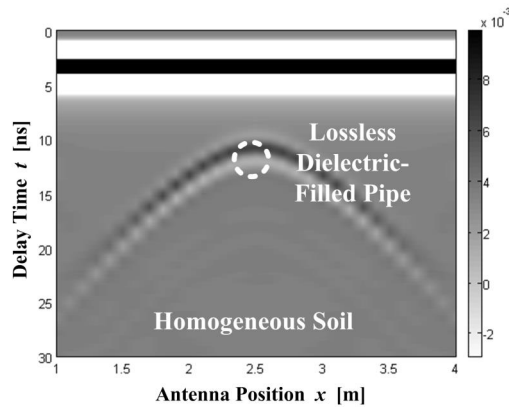
그림 4. 그림 3의 $x=2.5$ m에서 공기로 채워진 플라스틱 관에 의해 산란된 전계의 수신 파형

Fig. 4. Received waveform of electric fields scattered by the air-filled plastic pipes at $x=2.5$ m in Fig. 3.

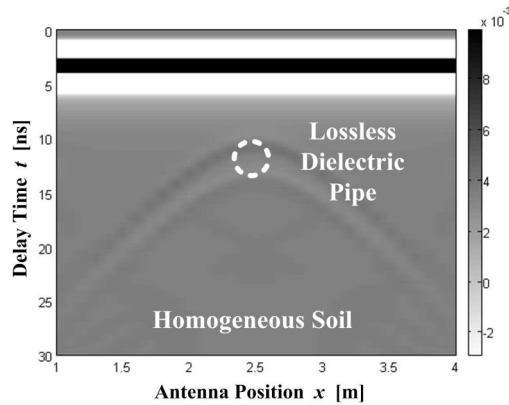
두 번째 비교 상황은 플라스틱 관의 지름은 $D=20$ cm 이고, 지하 배경매질($\epsilon_{rs}=5$)보다 낮은 유전율($\epsilon_{rp} < \epsilon_{rs}$)을 갖는 유전체로 플라스틱 관 속을 가득 채운 경우이다. 이러한 상황에 대한 GPR의 탐사자료를 FDTD 모의계산하여 B-scan 영상으로 나타내면 그림 5와 같다. 관 속을 채운 물질의 유전율과 지하 배경매질의 유전율 차이가 작을수록, 관에 의한 산란파가 작아지므로, 쌍곡선 패턴의 강도가 희미해지는 것을 볼 수 있다. 그림 5를 좀 더 자세히 분석하기 위해 $x=2.5$ m 지점에서 불필요한 직접 결합과 지표면 반사 성분은 제거한 후 매설관에 의한 산란파만을 비교하면 그림 6과 같다. 그림 6에 의하면 관 속을 채운 유전체의 상대유전율이 $1 \leq \epsilon_{rp} \leq 2$ 범위에서는 초기 반사파만 존재하고, 파형은 거의 동일하면서 지하 배경매질과 유전율 차이가 작을수록 신호의 진폭만 감소하였다. 이와는 달리, 관 속을 채운 유전체의 상대유전율이 $\epsilon_{rp}=4$ 인 경우에는 관의 외부를 둘러싼 지하 배경매질의 상대유전율($\epsilon_{rs}=5$)과 차이가 적은데도 불구하고, 시간이 약 15 ns 근방에서 약간의 파형 변화를 볼 수 있다. 이는 관 내부의 유전율이 높아질수록 마치 관의 지름이 증가한 것처럼 작용하므로, 관 하단의 오목면에 의한 축방향 반사파의 시간지연이 커져서 파형의 일부가 관 상단의 블록면에 의한 초기 반사파로부터 분리된 것이다.



(a) $\epsilon_{rp} = 1$



(b) $\epsilon_{rp} = 2$



(c) $\epsilon_{rp} = 4$

그림 5. 지하 배경매질($\epsilon_{rs}=5$)보다 낮은 유전율($\epsilon_{rp} < \epsilon_{rs}$)로 채워진 플라스틱 관의 B-scan 영상

Fig. 5. B-scan images of plastic pipes filled with dielectric materials of lower permittivity($\epsilon_{rp} < \epsilon_{rs}$) than background($\epsilon_{rs}=5$).

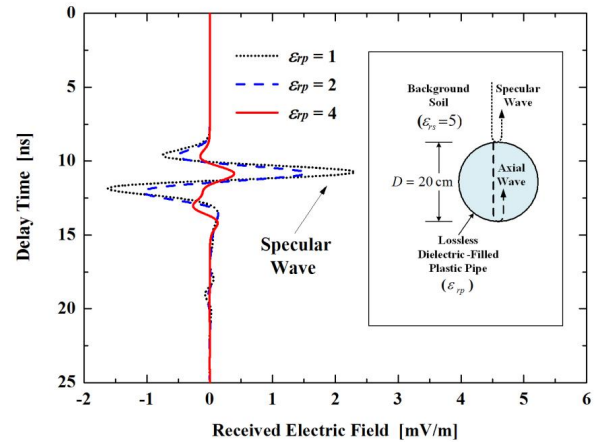


그림 6. 그림 5의 $x=2.5$ m 지점에서 유전체로 채워진 플라스틱 관에 의해 산란된 전계의 수신 파형

Fig. 6. Received waveform of electric fields scattered by the dielectric-filled plastic pipes at $x=2.5$ m in Fig. 5.

세 번째 비교 상황인 그림 7은 그림 5와는 반대로 지하 배경매질($\epsilon_{rs}=5$)보다 높은 유전율($\epsilon_{rp} > \epsilon_{rs}$)을 갖는 유전체로 채워진 플라스틱 관에 의한 GPR의 B-scan 탐사 영상을 FDTD로 모의계산한 결과이다. 그림 7에서 시간적으로 뚜렷하게 분리된 2개의 쌍곡선 패턴을 볼 수 있다. 하나는 약 10 ns에서 정점을 이루는 쌍곡선 패턴으로서 이는 지표면을 기준으로 관을 바라봤을 때 관 상단의 블록면에서 반사된 파이고, 나머지 다른 하나인 약 15 ns 부근에서 정점을 갖는 쌍곡선 패턴은 관 내부 하단의 오목면에서 반사된 측방향과 성분이다. 관 속의 유전체가 관의 외부를 둘러싸고 있는 배경매질의 유전율보다 점차적으로 높아짐에 따라 15 ns 근방의 쌍곡선 패턴의 강도가 커지는 것을 볼 수 있다. 그 이유는 관 속의 유전율이 높을수록 전자기파의 파장이 상대적으로 짧아진 효과로 작용하므로, 전자기파가 보는 관점에서 관의 지름이 커진 것과 같기 때문이다. 그런데, 그림 3(c)에서 공기로 채워진 관인 경우에 관의 상단과 하단에서 나타난 두 쌍곡선의 극성과 그림 7에서 볼 수 있는 두 쌍곡선 패턴의 극성은 정반대인 것을 볼 수 있다. 이는 전자기파가 유전율이 높은 매질에서 낮은 매질로 입사한 경우와 반대로 유전율이 낮은 매질에서 높은 매질로 입사하는 경우의 반사계수의 위상이 180도 차이가 나기 때문이다.

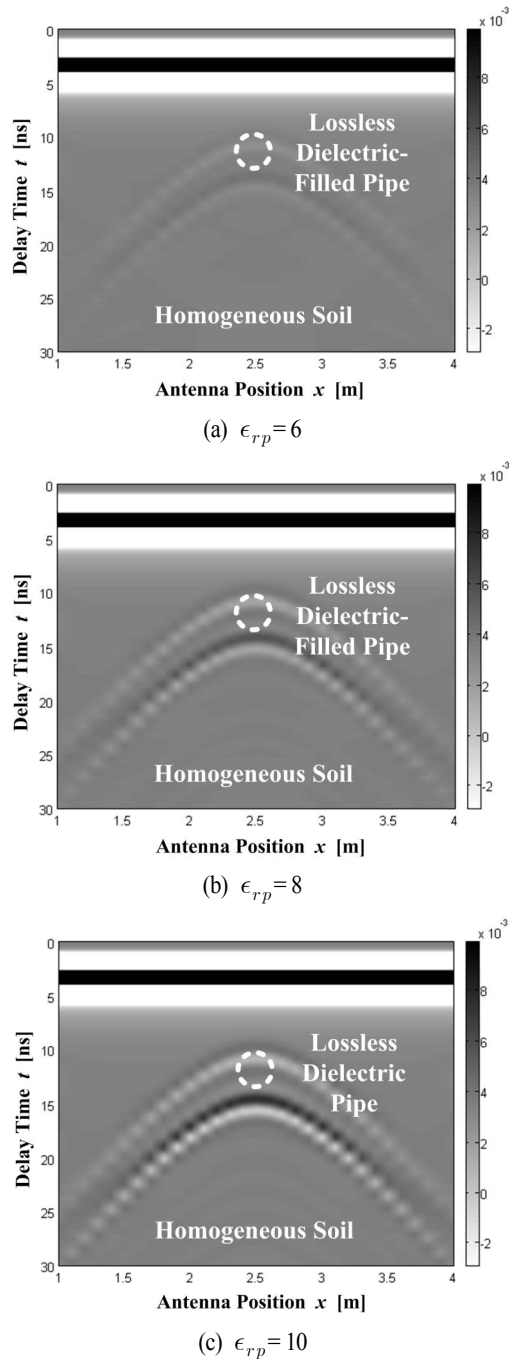


그림 7. 지하 배경매질($\epsilon_{rs}=5$)보다 높은 유전율($\epsilon_{rp} > \epsilon_{rs}$)로 채워진 플라스틱 관의 B-scan 영상

Fig. 7. B-scan images of plastic pipes filled with dielectric materials of higher permittivity($\epsilon_{rp} > \epsilon_{rs}$) than background($\epsilon_{rs}=5$).

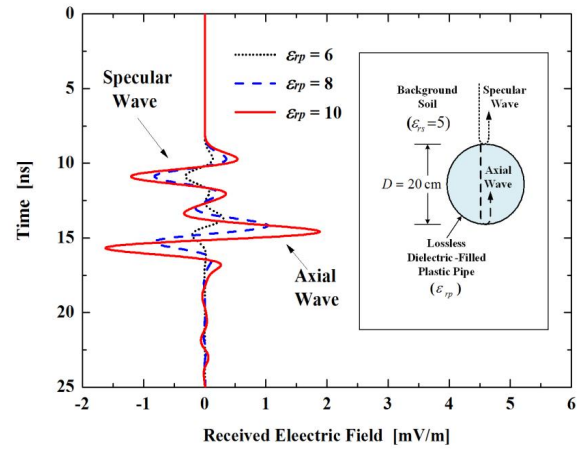


그림 8. 그림 7의 $x=2.5$ m 지점에서 유전체로 채워진 플라스틱 관에 의해 산란된 전계의 수신 파형

Fig. 8. Received waveform of electric fields scattered by the dielectric-filled plastic pipes at $x=2.5$ m in Fig. 7.

그림 7에서 송수신안테나의 위치가 $x=2.5$ m 지점에서 관에 의한 산란파 성분만을 추출하여 지연시간과 산란파 강도의 변화를 비교한 것은 그림 8과 같다. 그림 8에서 관 상단의 볼록면에 의한 초기 반사파와 관 내부 하단의 오목면에 의한 축방향 반사파의 극성이 정반대로 역전되었음을 알 수 있다.

III. 결 론

GPR을 이용하여 지하에 매설된 플라스틱관의 탐지 가능성을 수치해석으로 조사하였다. 관의 지름과 관 속에 채워진 매질의 유전율 변화에 따른 GPR 신호의 변화 양상을 FDTD 해석한 결과, 다음과 같은 2가지 특성을 알 수 있었다. (1) 관의 지름이 증가하거나 관 속을 채운 물질의 유전율이 높을수록 관 상단의 볼록면에 의한 초기 반사파와 관 하단의 오목면에 의한 축방향 반사파 사이의 시간차가 커져서 GPR 신호에서 두 파는 시간적으로 분리된다. (2) 관 속을 채운 물질의 유전율이 지하 배경매질의 유전율보다 낮은 경우와 높은 경우에 대한 GPR 신호의 극성은 서로 정반대가 된다. 따라서, 지하 배경매질의 유전율을 사전에 알고 있으면 GPR 신호의 진폭, 극성, 시간지연의 특성으로부터 매설된 플라스틱 관의 지름과

관 속에 채워진 물질에 대한 정보를 알아낼 수 있을 것이다. 본 연구에서 지하 배경매질을 무손실, 비분산, 균일로 가정하였으나, 실제 지하는 손실, 분산, 비균일 특성을 갖는 경우가 많다. 지하의 손실, 분산, 비균일성이 증가할수록 매설관에 의한 산란파를 GPR로 수신한 신호의 크기는 급격하게 감소하고, 수신패턴의 왜곡이 심해져서 정확한 시간지연 특성을 파악하기 어려워질 것이다. 이로 인하여 매설관 내부의 물질의 특성 파악뿐만 아니라, 매설관 자체의 탐지 가능성도 현저하게 낮아질 것이다. 향후 다양한 지하환경에 대한 FDTD 해석과 측정 실험을 수행하여 관련 내용을 후속 논문으로 제시할 것이다.

References

[1] 국토교통부, 국토지반정보 통합 DB구축사업, 국가지반정보 통합DB센터, <https://www.geoinfo.or.kr>

[2] D. J. Daniels, D. J. Gunton, and H. F. Scott, "Introduction to subsurface radar", *IEE Proc.*, vol. 135, Pt. F, vol. 4, pp. 278-320, Aug. 1988.

[3] D. J. Daniel, *Ground Penetrating Radar*, 2nd ed. London: IEE, 2004.

[4] 현승엽, 김세윤, "목조 건축물의 비파괴 검사를 위한 표면하부 탐사 레이더의 적용 가능성 검토: FDTD 모의계산과 실험 측정", *한국전자과학회논문지*, 13(8), pp. 790-796, 2002년 9월.

[5] 오현철, 조유선, 현승엽, 김세윤, "지하 탐사 레이더를 이용한 누수탐지 가능성 연구", *한국전자과학회논문지*, 14(6), pp. 616-624, 2003년 6월.

[6] 현승엽, 김세윤, "지하 탐사 레이더 영상에서 지하의 비균일 클러스터 저감을 위한 고유 영상기반 신호처리", *한국전자과학회논문지*, 23(11), pp. 1307-1314, 2012년 11월.

[7] 홍진영, 주정명, 한승훈, 오이석, "다양한 주파수 및 토양 조건에서 지뢰 탐지용 지표투과 레이더 수신신호의 수치해석", *한국전자과학회논문지*, 23(12), pp. 1412-1415, 2012년 12월.

[8] 현승엽, 김세윤, "매설관 주변 지하 공동 탐지를 위한 지하 탐사 레이더의 모의실험", *한국전자과학회논문지*, 27(2), pp. 131-137, 2016년 2월.

[9] A. Taflov, S. C. Hagness, *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method*, 3rd Ed. Boston, MA: Artech House, 2005.

[10] J. A. Roden, S. D. Gedney, "Convolution PML(CPML): an efficient FDTD implementation of the CFS-PML for arbitrary media", *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 27, no. 5, pp. 334-339, Dec. 2000.

[11] D. E. Barrick, "A note on scattering from dielectric bodies by the modified geometrical optics method", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 16, no. 2, pp. 275-277, Mar. 1968.

현 승 엽



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, 지하탐사 레이더 시스템, 플라즈마 조명 시스템