

지하 탐사용 레이더를 이용한 지하 구조물의 위치 파악법 및 근사 이미지 추출법

A New Method of Estimating the Buried Location and Extracting Approximate Image of Underground Structures using Ground Penetrating Radar

김동호 · 이승학 · 김채영

Dong-Ho Kim · Seung-Hak Lee · Che-Young Kim

요 약

본 논문에서는 지하 탐사용 레이더를 이용하여 공사현장에 매설된 파이프 또는 케이블의 위치를 파악하는 법 과 이에 따른 새로운 근사 이미지 추출 방법을 제안하였다. 기본 원리는 매설 구조물에 의해 산란된 광대역펄스 산란신호의 지연시간과 크기 복원에 기초를 두고 있다. 산란신호의 정확한 측정을 위해 레이더 탐색경로에 따른 수신신호의 절대치 적분 방법을 사용하였고, 이로 인해 다양한 지면 상태 하에서도 선명한 이미지 추출이 가능 하였다. 분산과 손실특성을 나타내는 다항 Debye모형을 사용하여 지하매질을 기술하였고, 모의 실험은 FDTD 방법을 사용하였다. 본 논문에서 제안한 이미지 추출방법은 시간영역에서의 전파 경로추적이라는 새로운 방법을 사용하였고, 이를 이용하여 구조물의 위치를 탐색하였다.

Abstract

A new ground penetrating radar imaging method for the estimation of buried artificial structures location and their approximate shapes in dispersive lossy ground is investigated. Fundamental idea is based on estimating delayed time and amplitude retrieval coefficients from scattered signals by buried scatterers. Using absolute value integration at each scanning site not only improves the accuracy of measured scattered signal, but also offers convenient ways to extract the image of buried structures. Multi-term Debye model was employed to describe a dispersive and lossy ground medium. We used the finite difference time domain method to discretize the wave equation in continuous form into the machine suitable form. This imaging method uses a new wave path tracing technique in time domain, which is helpful to identify the exact position of buried structures against the ground surface fluctuations.

I. 서 론

지하 탐사용 레이더(Ground Penetrating Radar)는 여러 분야에서 실생활에 활용되고 있다^{[1],[2]}. 지

하자원의 매장위치 탐사, 건축 구조물의 비파괴 검 사, 공사시 지하 매설 구조물의 사전 위치 파악, 지뢰탐지, 불발된 폭발물 제거 등 그 적용 분야가 광범 위하다. 이러한 지하 탐사용 레이더는 지하에 매설

「본 연구는 국방과학연구소 기초연구의 일부 재정지원하에 수행되었음(과제번호 ADD-98-2-3)」
경북대학교 전자·전기공학부(Dept. of Electronics, Kyungpook National University)

· 논문 번호 : 991224-120
· 수정완료일자 : 2000년 3월 10일

된 구조물까지의 굴착이나 구조물을 직접 파괴하지 않는다는 장점을 갖고 있다. 본 논문에서는 언급된 적용 분야 중 공사현장에 매설된 파이프의 위치 파악에 초점을 맞추고, 이에 대한 새로운 근사 이미지 추출 방법을 제안하였다.

기본 원리는 송신 안테나에서 방사된 광대역펄스가 지하 매설 구조물에 반사되어 수신 안테나로 되돌아 오는 전파 지연시간 및 크기 복원계수 측정에 있다. 송·수신 안테나로는 bow-tie 안테나를 사용하였으며, 송신파를 시간영역에서 폭이 좁은 광대역펄스로 만들기 위해 안테나 양쪽 끝 부분을 저항으로 중단시킨 구조를 사용하였다^[3]. 지하 매질의 주파수 변화에 따른 분산 및 손실 특성을 나타내기 위해 다항 Debye 모델이 사용되었으며, 2.5%, 5%, 그리고 10%의 수분함유량에 따라 모델링하였다^[4].

레이다 탐색 위치에 따른 수신측에서의 산란신호의 추출을 위해서 절대치 적분(Absolute value integration) 방법을 적용하였는데, 이 방법은 이미지 복원을 위한 전파 경로추적 알고리즘에 있어 중요한 역할을 한다. 매설 구조물의 위치 파악과 이미지 복원을 위한 지연시간과 신호 크기 복원계수 추출에는 WRELAX(Weighted Fourier Transform based on RELAXation method) 방법을 사용하였다^[5]. 마지막으로 복원 계수들을 이용한 매설 구조물의 근사 이미지 복원 방법을 제시하였다. 복원계수들의 추출과 이미지 복원을 제외한 모든 모의 실험에는 FDTD 방법을 사용하였다. 흡수 경계 조건으로는 지상에서는 완전 정합층(PML: Perfectly Matched Layer)을 사용하였고, 지하에서는 분산매질에 대한 완전 정합층(DPML: PML for Dispersive media)을 사용하였다^{[6],[7]}.

II. 지하 매질에 대한 FDTD 방법의 공식화

2-1 지하 매질의 다항 Debye 모델

지하 매질은 침투 주파수에 따라서 서로 다른 분산 및 손실 특성을 나타낸다. 본 논문에서는 지하매질의 모델링을 위해 매질의 수분함유량에 따라 서로 상이한 파라미터를 갖는 다항 Debye 모델을 사용하였다. 동작 주파수의 함수인 다항 Debye 모델식은

다음과 같다.

$$\epsilon_r(\omega) = \epsilon_\infty + \chi(\omega) + \frac{\sigma}{j\omega\epsilon_0} \quad (1a)$$

$$\chi(\omega) = \sum_{p=1}^N (\epsilon_p - \epsilon_\infty) / (1 + j\omega\tau_p) \quad (1b)$$

여기서 ϵ_0 는 자유공간 유전율이다. ϵ_r 과 σ 는 각각 지하매질의 비유전율과 전도율이다. ϵ_∞ 와 ϵ_p 는 주파수가 무한대일 때와 DC일 때의 비유전율이고, τ_p 는 매질 고유의 이완 시간(relaxation time)이다. 이 때 값을 조정함으로써 매질의 전기적 특성을 변화시킬 수 있는데, 그 원리는 곡선의 다항근사(Polynomial approximation) 방법과 유사하다. 본 논문에서는 식 (1a)의 비유전율을 관심 주파수 대역인 DC~1 GHz에서의 실험치 유전율과 맞추기 위해 $N=2$ 로 두었다^[4]. 사용된 지하 매질의 파라미터가 표 1에 주어져 있다.

지하 매질에서 전계 강도와 전속 밀도간의 관계식은 다음과 같다.

$$D(t) = \epsilon_\infty \epsilon_0 E(t) + \epsilon_0 \int_0^t E(t-\Lambda) \chi(\Lambda) d\Lambda \quad (2)$$

여기서 $\chi(\Lambda)$ 는 식 (1b)에 주어져 있다. $D^n = D(n\Delta t)$ 와 $E^n = E(n\Delta t)$ 의 표기법을 사용하여 식 (2)를 아래처럼 근사화 시킨다.

$$D^n = \epsilon_\infty \epsilon_0 E^n + \epsilon_0 \int_0^{n\Delta t} E(n\Delta t - \Lambda) \chi(\Lambda) d\Lambda \quad (3)$$

식 (2)와 (3)에서 E 와 χ 는 시간영역에서의 컨볼루션(Convolution)인데, 이를 직접 계산하게 되면

표 1. 모의 실험에 사용된 다항 Debye 모델 파라미터
Table 1. Multi-term Debye model parameters in computer simulation.

Moisture	ϵ_∞	σ (mS/m)	ϵ_1	ϵ_2	τ_1 (nsec)	τ_2 (nsec)
2.5 %	3.20	0.397	3.95	3.50	2.71	0.108
5.0 %	4.15	1.11	5.95	4.75	3.79	0.151
10.0 %	6.00	2.00	8.75	6.75	3.98	0.251

수행 시간 및 컴퓨터 메모리 사용량이 증가한다. 이러한 단점을 보완하기 위해 선형절편 반복 컨벌루션 (Piecewise Linear Recursive Convolution) 방법이 사용되었다^[8]. 선형절편 반복 컨벌루션을 이용한 전속 밀도의 시간 차분 결과식은 아래와 같다.

$$D^{n+1} - D^n = \varepsilon_0 \left\{ \varepsilon_\infty + \sum_{p=1}^N (\chi_p^0 - \xi_p^0) \right\} E^{n+1} + \varepsilon_0 \left(\sum_{p=1}^N \xi_p^0 - \varepsilon_\infty \right) E^n - \varepsilon_0 \sum_{p=1}^N \Psi_p^n \quad (4a)$$

$$\Psi_p^n = \sum_{m=0}^{n-1} \left\{ E^{n-m} \Delta \chi_p^m + (E^{n-m-1} - E^{n-m}) \cdot \Delta \xi_p^m \right\} \quad (4b)$$

$$\chi_p^m = \int_{m\Delta t}^{(m+1)\Delta t} \chi_p(\Lambda) d\Lambda, \quad \xi_p^m = \frac{1}{\Delta t} \int_{m\Delta t}^{(m+1)\Delta t} (\Lambda - m\Delta t) \chi_p(\Lambda) d\Lambda \quad (4c)$$

단, $\Delta \chi_p^m = \chi_p^m - \chi_p^{m+1}$ 이고, $\Delta \xi_p^m = \xi_p^m - \xi_p^{m+1}$ 이다.

식 (4b)는 시간영역에서의 컨벌루션이기에 계산시 효율이 저하된다. 이를 극복하기 위하여 변수 $\chi_p(\omega)$ 의 푸리에 역변환을 이용한 반복 합산 (Recursive summation) 알고리즘을 사용하였다. 식 (4a)를 맥스웰 방정식의 암페어 법칙에 적용하면 아래의 FDTD 표현식이 얻어진다.

$$E_x |_{i+1/2, j, k}^{n+1} = C_a \left\{ \left(\varepsilon_\infty - \sum_{p=1}^N \xi_p^0 - \frac{\sigma \Delta t}{2\varepsilon_0} \right) \cdot E_x |_{i+1/2, j, k}^n + \sum_{p=1}^N \Psi_{px} |_{i+1/2, j, k}^n + \frac{\Delta t}{\varepsilon_0 \Delta} [H_z |_{i+1/2, j+1/2, k}^{n+1/2} - H_z |_{i+1/2, j-1/2, k}^{n+1/2} + H_y |_{i+1/2, j, k-1/2}^{n+1/2} - H_y |_{i+1/2, j, k+1/2}^{n+1/2}] \right\} \quad (5a)$$

$$E_y |_{i+1/2, j, k}^{n+1} = C_a \left\{ \left(\varepsilon_\infty - \sum_{p=1}^N \xi_p^0 - \frac{\sigma \Delta t}{2\varepsilon_0} \right) \cdot E_y |_{i, j+1/2, k}^n + \sum_{p=1}^N \Psi_{py} |_{i, j+1/2, k}^n + \frac{\Delta t}{\varepsilon_0 \Delta} [H_x |_{i, j+1/2, k+1/2}^{n+1/2} - H_x |_{i, j+1/2, k-1/2}^{n+1/2} + H_z |_{i-1/2, j+1/2, k}^{n+1/2} - H_z |_{i+1/2, j+1/2, k}^{n+1/2}] \right\} \quad (5b)$$

$$E_z |_{i, j, k+1/2}^{n+1} = C_a \left\{ \left(\varepsilon_\infty - \sum_{p=1}^N \xi_p^0 - \frac{\sigma \Delta t}{2\varepsilon_0} \right) \cdot E_z |_{i, j, k+1/2}^n + \sum_{p=1}^N \Psi_{pz} |_{i, j, k+1/2}^n + \frac{\Delta t}{\varepsilon_0 \Delta} [H_y |_{i+1/2, j, k+1/2}^{n+1/2} - H_y |_{i-1/2, j, k+1/2}^{n+1/2} + H_x |_{i+1/2, j+1/2, k}^{n+1/2} - H_x |_{i+1/2, j-1/2, k}^{n+1/2}] \right\} \quad (5c)$$

단, $C_a = 1 / \left[\varepsilon_\infty + \sum_{p=1}^N (\chi_p^0 - \xi_p^0) + \sigma \Delta t / 2\varepsilon_0 \right]$ 이다. Δ 는 FDTD 방법에서 공간 단위격자 증가분을 의미하며, 본 논문에서는 $\Delta = \Delta x = \Delta y = \Delta z$ 로 두었다. 그리고 Courant 안정조건을 만족하도록 $\Delta t \leq \Delta / \sqrt{3}c$ 로 정하였다.

2-2 흡수 경계조건

본 논문에서는 지면 위와 지하매질의 흡수 경계조건을 서로 다르게 하였다. 지면 위는 PML을 사용하였고, 지하매질에서는 DPML을 사용하였다. 본 논문에서는 DPML의 유도과정만을 간단히 제시하였다. $e^{j\omega t}$ 시간 의존성이 사용된 확장 좌표계 (Stretched coordinate)에서의 맥스웰 방정식은 아래와 같다.

$$\nabla_s \times \mathbf{E} = -j\omega \mathbf{B} \quad (6a)$$

$$\nabla_s \times \mathbf{H} = \sigma \mathbf{E} + j\omega \mathbf{D}$$

$$\nabla_s = \hat{x} \frac{1}{s_x} \frac{\partial}{\partial x} + \hat{y} \frac{1}{s_y} \frac{\partial}{\partial y} + \hat{z} \frac{1}{s_z} \frac{\partial}{\partial z} \quad (6b)$$

s_x, s_y, s_z 는 주파수 종속적인 확장 좌표 변수를 나타내며, 다음과 같이 표현된다.

$$s_i(i) = s_{i0}(i) \left[1 + \frac{\sigma_i(i)}{j\omega \varepsilon} \right], \quad i = x, y, z \quad (7)$$

식 (7)에서 $s_{i0}(i)$ 와 $\sigma_i(i)$ 는 좌표 i 와 관련된 전파 흡수 파라미터이다^[6]. 전장 성분의 DPML 관계식은 다음과 같다.

$$E_{xy} |_{i+1/2, j, k}^{n+1} = C_a(y) \left[C_b(y) E_{xy} |_{i+1/2, j, k}^n + \frac{\varepsilon_0}{\Delta t} \sum_{p=1}^N \Psi_{pxy}^n - \frac{\sigma_y}{2} \sum_{p=1}^N \Omega_{pxy}^n - F_{xy} |_{i+1/2, j, k}^{n+1/2} + \frac{1}{s_{y0} \Delta} \right]$$

$$\cdot (H_z |_{i+1/2, j+1/2, k}^{n+1/2} - H_z |_{i+1/2, j-1/2, k}^{n-1/2}) \quad (8a)$$

$$F_{ij}^{n+1/2} = F_{ij}^{n-1/2} + \frac{\Delta t \sigma_j}{\epsilon_0} E_{ij}^n \quad (8b)$$

$$\Psi_{pij}^n = (\Delta \chi_p^0 - \Delta \xi_p^0) E_{ij}^n + \Delta \xi_p^0 E_{ij}^{n-1} + e^{-\Delta t/\tau_p} \Psi_{pij}^{n-1} \quad (8c)$$

$$\Omega_{pij}^n = (\Delta \chi_p^0 - \Delta \xi_p^0) E_{ij}^n + \Delta \xi_p^0 E_{ij}^{n-1} + e^{-\Delta t/\tau_p} \Omega_{pij}^{n-1} \quad (8d)$$

$$\Delta \chi_{ps}^m = \chi_p^m + \chi_p^{m+1}, \quad \Delta \xi_{ps}^m = \xi_p^m + \xi_p^{m+1} \quad (8e)$$

단, $C_a(m) = 1 / \left\{ \epsilon_0 \left(\epsilon_\infty + \sum_{p=1}^N (\chi_p^0 - \xi_p^0) \right) \cdot \left(\frac{1}{\Delta t} + \frac{\sigma_m}{2\epsilon_0} \right) + \frac{\sigma}{2} \right\}$, $m = x, y, z$,

$$C_a(m) = -\epsilon_0 \left\{ \frac{1}{\Delta t} \left(\sum_{p=1}^N \xi_p^0 - \epsilon_\infty \right) + \frac{1}{2\epsilon_0} \left(\sigma_m \left(\epsilon_\infty + \sum_{p=1}^N \xi_p^0 \right) + \sigma \right) \right\}$$

$m = x, y, z$ 이다.

식 (8)에서 아래첨자 i 와 j 는 각각 x, y, z 변수를 나타내며, $i \neq j$ 이다. 자장 성분의 DPML 관계식은 다음과 같다.

$$H_{xy} |_{i, j+1/2, k+1/2}^{n+1/2} = D_a(y) \left\{ \left(\frac{\mu_0}{\Delta t} - \frac{\mu_0 \sigma_y}{2\epsilon_0} \right) \cdot H_{xy} |_{i, j+1/2, k+1/2}^{n-1/2} - \frac{1}{s_{yo} \Delta} (E_z |_{i, j+1, k+1/2}^n - E_z |_{i, j, k+1/2}^n) \right\} \quad (9)$$

단, $D_a(m) = 1 / \left(\frac{\mu_0}{\Delta t} + \frac{\mu_0 \sigma_m}{2\epsilon_0} \right)$, $m = x, y, z$ 이다.

식 (8)과 (9)에서 생략된 전장 및 자장 성분들도 일반적인 확장 좌표계에 기본을 둔 PML 유도 과정과 동일하며, 본 논문에서는 생략하였다^[7].

III. 지하 탐사용 레이더의 동작원리

3-1 레이더의 구성

본 논문에서 사용한 지하 구조물의 탐색 구성도는 그림 1과 같다. 송·수신기 쌍으로 구성된 레이더가 일정한 간격으로 지면 위를 탐색(Scan)한다. 사용한 탐색 간격은 8 cm이고, 지면과 레이더 이격 거리는 4 cm이며, 각 탐색 지점에서의 측정 소요 시간은 21.0 nsec 이다. 그리고 송·수신 안테나의 급전점 간 거리는 20 cm이다.

그림 1에서 안테나의 송·수신 편파는 모두 x 방향이며, 구조물이 x 방향과 길게 평행한 형태이면 수신전력은 최대가 된다. 또한 지하 구조물의 횡단 방향(y 방향)으로는 단 한 번의 탐색만으로 위치 파악이 가능하다. 본 논문에서는 매설 구조물의 횡단 방향을 찾기 위한 레이더 탐색 과정은 생략하였으며, 모의 실험은 구조물의 횡단 경로에 대해서 이루어졌다.

그림 2는 송·수신 안테나 구조이다. 사용한 안테

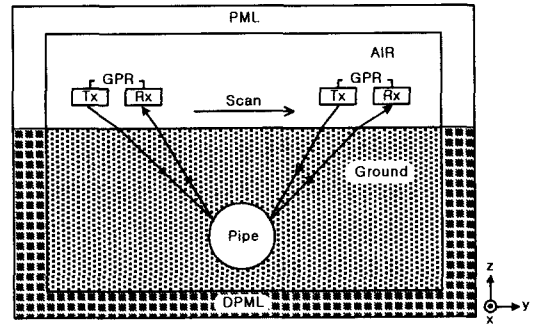


그림 1. 매설 구조물의 탐색도
Fig. 1. GPR scan for a buried artificial structure.

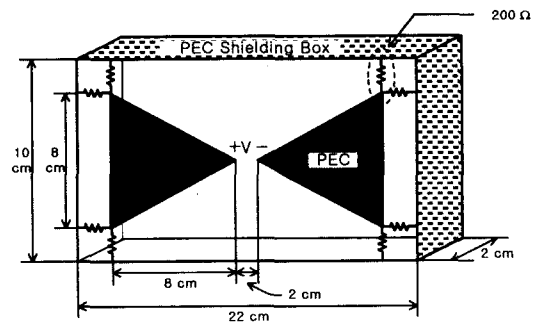


그림 2. 저항 종단이 사용된 bow-tie 안테나 구조
Fig. 2. Bow-tie antenna structure using resistor loading technique.

나는 bow-tie형인데 이는 펄스의 왜곡 방지가 용이하기 때문이다. 그리고 광대역의 송신 펄스를 얻기 위해 안테나 양쪽 날개 끝 부분을 저항(Resistor)으로 종단시켰으며, 저항은 일반적인 수동소자 모델링 방법을 적용하였다. 또한 지하로의 침투 전력을 높이기 위해 지면 방향을 제외한 나머지 부분을 금속으로 차폐 시켰다. 안테나의 날개와 저항 그리고 금속 차폐부분은 모의실험 동안 함께 연동되도록 코딩(coding)을 하였다. 안테나와 매설 파이프 등의 모든 구조물 모델에는 계단형 격자가 사용되었다.

3-2 지연시간 측정 알고리즘

그림 1의 구조에서 수신기에 유기되는 신호의 종류는 다음과 같다.

- * 송신기에서 오는 직접파 (V_d)
- * 지면 반사파 (V_r)
- * 산란체에 의한 산란파 (V_s)
- * 잡음 등의 기타 신호 (V_n)

지면의 굴곡이 심하지 않고 지하 매질의 전기적 성질이 탐색 경로에 민감하지 않다면, 산란체에 의한 산란신호는 다음 방법에 의한 근사적 추출이 가능하다^[3]. 먼저 지하에 산란체가 없을 때의 총 수신신호를 V_{r1} 이라 하고 산란체가 있을 때의 총 수신신호를 V_{r2} 라 하면, 산란신호 V_s 는

$$V_s \approx V_{r2} - V_{r1} \quad (10)$$

와 같다.

정확한 V_s 를 얻기 위해 V_{r1} 과 V_{r2} 추출시의 지하매질은 전기적 특성과 지표면 굴곡이 동일해야 한다. 위의 선결조건을 만족하려면 V_{r1} 과 V_{r2} 의 측정은 동일 지역에 대해 행해져야 한다. 즉, V_{r1} 의 측정을 위해서는 매설 구조물을 지면위로 들어내야 함을 의미하는데, 이는 지하 탐사용 레이더의 목적에 부합되지 않는 과정이다. 지적된 문제점을 보완하기 위해 본 논문에서는 지하 매질의 여러 가지 성질 변화에도 적용 가능한 새로운 산란신호 추출방법을 제시하였다. 송신신호가 가우시안 펄스(Gaussian Pulse)인 경우 레이더와 산란체 간의 거리에 따라서 수신신호의 절대치 적분 결과가 달라진다. 그 적분

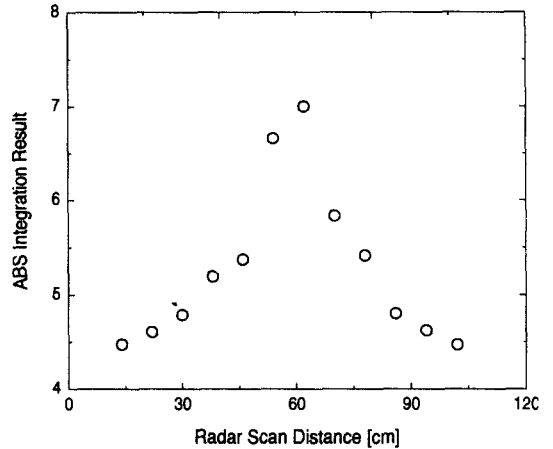


그림 3. 수신신호의 레이더 탐색 위치에 따른 절대치 적분 결과

Fig. 3. ABS value integration result for received signal at some different radar scanning positions.

결과는 산란체와 레이더 간의 거리가 가장 가까울 때 최대값을, 가장 멀 때 최소값을 가진다. 이를 이용한 유사 산란신호(Pseudo-scattered field)의 추출법은 다음과 같다. 동일 산란체에 대하여 각각의 레이더 탐색 지점에서의 수신신호를 $y_i(t)$, 최소 절대치 적분값을 준 점의 수신신호를 $y_{min}(t)$ 라 하면, 유사 산란신호는 식 (11)로부터 추출된다.

$$V_{pseudo}^i(t) = y_i(t) - y_{min}(t) \quad (11)$$

$V_{pseudo}^i(t)$ 는 탐색 회수 i 에 대한 시간영역의 유사 산란신호이다. 그림 3은 수분 함유량이 5%인 지하 20cm에 매설된 지름 8cm 도체 파이프에 대한 절대치 적분 결과이다. 그림에서 레이더와 매설 파이프의 거리가 가장 가까운 레이더 탐색 경로점인 68cm지점에서의 적분결과가 가장 크게 나타났다.

그림 4는 식 (10)에 의한 산란신호와 식 (11)에 의한 유사 산란신호의 비교 그림이다. 인가 전압은 최대치가 100 V, 펄스폭이 3.5 nsec인 가우시안 펄스이다. 그림에서 8 nsec 까지는 두 신호가 거의 흡사하다. 특히 1차 반사파가 위치하고 있는 5 nsec 부근에서는 두 신호가 더욱 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 이미지 추출시 1차 반사파만이 사용된다. 따라서 새롭게 제안한 유사산란신호 추출법을 사용하더

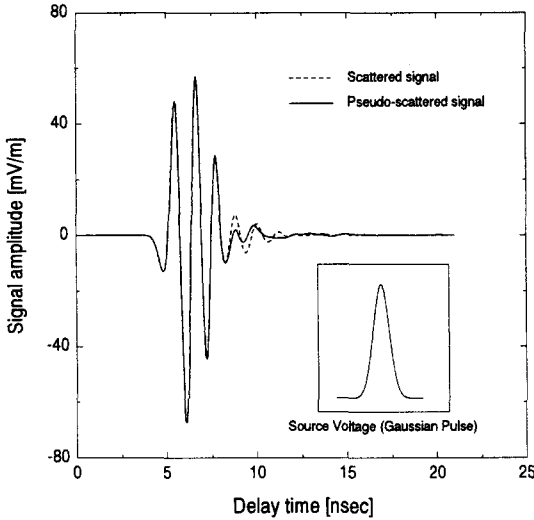


그림 4. 산란신호와 유사 산란신호의 비교
 Fig. 4. The comparison result of scattered signal with pseudo-scattered signal.

라도 이미지 추출에는 아무런 문제가 없음을 알 수 있다.

복원계수 추출 알고리즘은 기지의 송신신호를 적절히 조합하면 수신신호가 복원될 수 있다는 기본 원리에 근거한다. 수신신호를 $y(t)$, 송신신호를 $s(t)$, 그리고 잡음신호를 $e(t)$ 라 하면 $y(t)$ 는 다음과처럼 표현된다.

$$y(t) = \sum_{i=1}^L a_i s(t - \tau_i) + e(t), \quad 0 \leq t \leq T \quad (12)$$

여기서 a_i 과 τ_i 은 각각 크기 복원 계수와 지연 시간이며, T 는 레이더의 1회 탐색 소요 시간이다. 식 (12)의 주파수 영역 표현식은 다음과 같다.

$$Y(k) = S(k) \sum_{i=1}^L a_i e^{j\omega_i k} + E(k), \quad k = -N/2, -N/2+1, \dots, N/2-1 \quad (13)$$

여기서 $\omega_i = -(2\pi\tau_i/NT_s)$ 이고, T_s 는 샘플링 시간이다. 식 (13)에서 미지수 a 와 ω 는 비선형으로 결합되어 있으며, 이는 결국 다음의 비선형 최소 사승법(Nonlinear least square)에 의한 미지의 파라미터 산출방법이 된다.

$$C_1(\{a_i, \tau_i\}_{i=1}^L)$$

$$= \sum_{k=-N/2}^{N/2-1} \left| Y(k) - S(k) \sum_{i=1}^L a_i e^{j\omega_i k} \right|^2 \quad (14)$$

식 (14)의 최소화를 위한 행렬식을 구성하면 아래와 같다.

$$Y_l = Y - \sum_{i=1, i \neq l}^L \hat{a}_i [S a(\hat{\omega}_i)] \quad (15)$$

여기에서 $a(\omega_l) = [e^{j\omega_l(-N/2)} e^{j\omega_l(-N/2+1)} \dots e^{j\omega_l(N/2-1)}]^T$ 이고, $(\cdot)^T$ 는 전치행렬을 의미한다. 식 (15)를 이용한 미지수 a 와 ω 는 다음과 같은 방법으로 추출할 수 있다.

$$\hat{\omega}_l = \arg \left\{ \max_{\omega_l} \text{Re} [a^H(\omega_l)(S^* Y_l)]^2 \right\} \quad (16a)$$

$$\hat{a}_l = \frac{\text{Re} [a^H(\omega_l)(S^* Y_l)]}{\|S\|_F^2} \Big|_{\omega_l = \hat{\omega}_l} \quad (16b)$$

단, $\text{Re}(X)$ 는 X 의 실수 부분, $(\cdot)^*$ 는 공액 복소(Complex conjugate), $(\cdot)^H$ 는 공액 전치(Conjugate transpose)를 나타내며, $\|\cdot\|_F$ 는 Frobenius norm을 의미한다.

- 과정 1 : $L=1$ 로 가정하고, 식 (16)을 이용하여 Y 로부터 $\{\hat{a}_1, \hat{\omega}_1\}_{l=1}$ 을 구한다.
- 과정 2 : $L=2$ 로 가정하고, 과정 1에서 구한 $\{\hat{a}_1, \hat{\omega}_1\}_{l=1}$ 을 식 (15)에 적용시켜 Y_2 를 구하고, 다시 Y_2 로부터 $\{\hat{a}_2, \hat{\omega}_2\}_{l=2}$ 를 구한다. $\{\hat{a}_1, \hat{\omega}_1\}_{l=2}$ 를 이용하여 Y_1 을 재계산하고, 이를 이용하여 $\{\hat{a}_1, \hat{\omega}_1\}_{l=1}$ 값을 수정한다.

위의 과정 1, 2를 반복하여 식 (14)의 C_1 이 설정된 허용 한계치 이하가 될 때까지 $\{\hat{a}_l, \hat{\omega}_l\}_{l=1}^L$ 을 구한다. 매설 산란체에 의한 1차 반사파는 유사 산란신호 중 지연시간이 가장 짧으며 크기 복원계수 또한 비교적 큰 편이다. 따라서 본 논문에서는 특별한 C_1 을 설정하지 않고 가장 짧은 지연시간을 갖는 신호를 1차 반사파로 사용하였다.

수분 5%인 지하 20cm에 매설된 도체 파이프에 의한 유사 산란신호를 지연시간 추정 알고리즘으로 재구성한 것이 그림 5이다. 점선 부분이 유사 산란

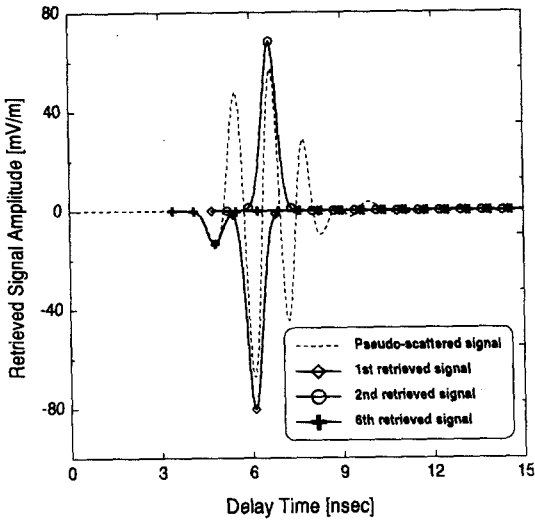


그림 5. 유사 산란신호로부터 지연시간 및 크기 복원 계수 추출

Fig. 5. The extraction of delay time and retrieval amplitude coefficients from pseudo-scattered signal.

신호이고, 실선 부분이 지연시간 측정 알고리즘으로 재구성된 부분이다. 복원계수의 절대치가 가장 큰 신호부터 차례로 복원되고 있으며, 산란체에 의한 1차 반사파는 6번째로 복원되었음을 알 수 있다.

IV. 매질 구조물의 근사 이미지 추출 방법

본 논문에서 제시한 새로운 전파경로 추적 알고리즘이 그림 6에 주어져 있다.

매질 깊이가 얇은 구조물을 탐색할 때는 지하 구조물의 정확한 위치와 형상 파악을 위해 지면과 레이다간의 이격거리가 주는 효과를 정확히 계산하여야 한다. 즉, 송신신호와 수신신호의 지면 교점인 p_t 와 p_r 의 위치를 정확히 찾아야 하며, 이는 정해진 p 점을 기준으로 한 l_1 과 l_2 의 정확한 계산을 의미한다. 탐색해야 할 지하를 일정한 간격의 셀(Cell)로 이루어진 이미지 공간으로 정의하고 각 셀의 중심에서 안테나까지의 거리를 r 이라 하면, 스넬의 법칙(Snell's law)과 기하 광학(Geometrical optics)을 이용하여 각 매질에서의 전파거리 l_1 과 l_2 를 다음과 같이 표현할 수 있다.

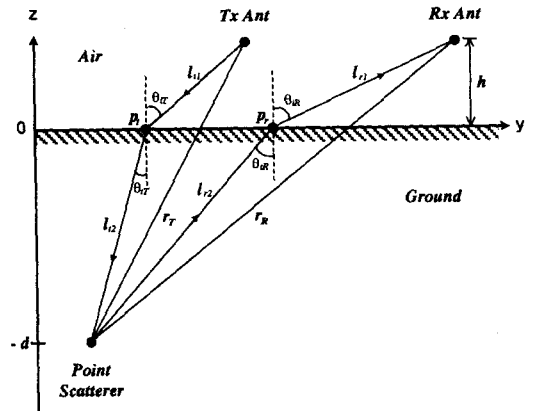


그림 6. 전파 경로 추적을 통한 새로운 이미지 구성법
Fig. 6. A new image forming method by tracing the possible wave propagation path.

$$l_1 = \frac{h}{\sqrt{1 - \sin^2 \theta_i}} \quad (17a)$$

$$l_2 = \frac{d}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2 \sin^2 \theta_i}} \quad (17b)$$

c 는 광속도이고, v 는 $z \leq 0$ 인 영역에서 전파의 속도이다. 식 (17)을 이용하여 그림 6에 보인 r_m 을 계산하면

$$r_m = 2dh + \frac{h^2}{1 - \sin^2 \theta_{im}} + \frac{d^2}{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2 \sin^2 \theta_{im}} + \frac{2dhv \sin^2 \theta_{im}}{c \sqrt{1 - \sin^2 \theta_{im}} \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2 \sin^2 \theta_{im}}} \quad (18)$$

이 된다. 단, 아래첨자 m 은 T 또는 R 이다. 총 지연시간 T_d 는 송신기에서 산란체까지의 지연시간 T_d^{Tx} 와 산란체에서 수신기까지의 지연시간 T_d^{Rx} 의 합으로서 아래와 같다.

$$T_d = T_d^{Tx} + T_d^{Rx} = \left(\frac{l_1 + l_2}{c} \right) + \left(\frac{l_1 + l_2}{v} \right) \quad (19)$$

이미지 공간에서의 산란체 이미지 구성 방법으로

는 2진 결정(Binary decision) 방법이 사용되었다^[9]. 식 (18)과 (19)를 이용하여 이미지 공간의 각 셀에서 계산된 지연시간 T_d' 이 허용 오차 한계 내에서 지연시간 T_d 와 일치할 경우 그 셀을 "1[on]"로 두고, 그렇지 못한 경우를 "0[off]"으로 하여 산란체의 이미지를 구성하였다. 이미지 구성에는 다음식을 사용하였다.

$$I(y_j, z_k) = \sum_{m=1}^M I_m(y_j, z_k) + \begin{cases} 1, & \text{if } T_d' - T_{err} < T_d < T_d' + T_{err} \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (20)$$

단, $I(y_j, z_k)$ 는 이미지 배열로서 구성된 이미지의 강도(Intensity)이다. M 은 전체 레이더의 지하 탐색 회수를 나타내고, T_{err} 은 최대 허용가능 오차 한계이다. T_{err} 값은 이미지 평면 한 셀에 대한 전파 시간으로 사용하였다. 셀의 크기는 이미지의 해상도(Resolution)를 좌우하는 요소인데, FDTD 공간 분할 셀 크기의 1/3인 값을 사용하였다. 식 (20)은 송·수신점을 초점으로 하는 타원 궤적의 집합이며, 각 궤적간 교차영역의 이미지화를 위하여 이미지 배열 $I(y_j, z_k)$ 의 평균을 문턱값으로 사용하였다.

지연시간 측정 알고리즘을 이용하여 지하 수분 함유량에 따른 1차 반사파의 지연시간 차이를 보인 것이 그림 7이다. 매설 구조물은 깊이 20 cm, 레이더 탐색 중심점 거리 68 cm에 위치하고 있는 지름이 8 cm인 도체 파이프 한 개이다. 그림에서 지하매질의 수분 함유량이 증가함에 따라서 지연시간이 길어지는 것을 볼 수 있다.

그림 8은 10%의 수분이 함유된 지하에 매설된 구조물에 의한 총 수신신호이다. 여기서 나타난 일직선은 지면에 의한 반사파의 영향이며, 매설 구조물은 그림 7에서와 동일하다. 그림 7과 8을 비교해보면, 1차 반사파의 지연시간이 서로 다르다. 이는 가우시안 송신펄스의 첨두(peak) 부분이 시간축 상의 원점에 위치하지 않기 때문이다. 일반적인 지하 탐사용 레이더에 수신되는 신호는 그림 8과 같은데, 그림 8에서 그림 7의 지연시간을 찾아내기가 쉽지 않음을 알 수 있다.

제안된 전파경로 추적 알고리즘으로 구성된 두

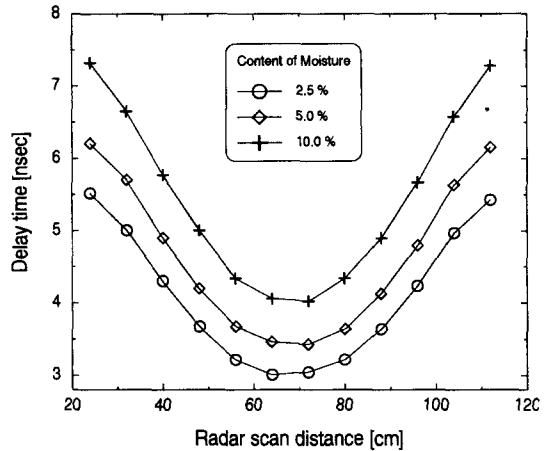


그림 7. 지하 수분 함유상태에 따른 도체 파이프 하나에 의한 지연시간 차이

Fig. 7. The difference of delayed time versus some contents of moisture in soil for one PEC pipe.

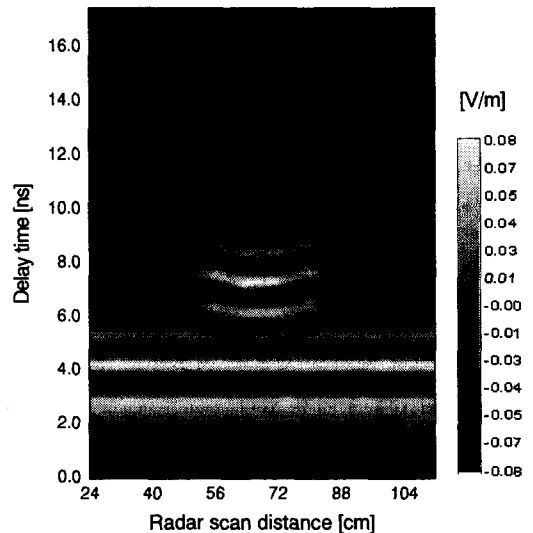


그림 8. 수분이 10% 함유된 지하에 매설된 도체 파이프 하나에 의한 총 수신신호

Fig. 8. Total received signal by one PEC pipe in 10% of moisture containing soil.

개의 도체 파이프 이미지는 그림 9와 같다. 수분이 5% 함유된 지하에 지름이 8cm인 동일 크기의 두개의 파이프가 20 cm 깊이에 매설되어 있다. 그림 6의 좌표계에서 두 파이프의 축 방향 매설 위치는 각각

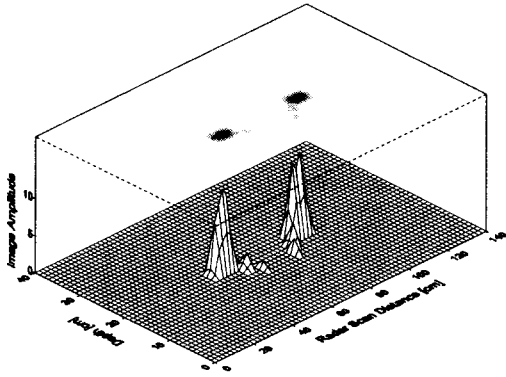


그림 9. 수분 함유량 5 %인 지면 20 cm 아래에 위치한 두개의 도체 파이프 근사 이미지

Fig. 9. Approximate image of 2 PEC pipes in 5 % of moisture containing soil, depth is 20 cm.

$y=48\text{ cm}$ 와 $y=88\text{ cm}$ 이다. 그림 9를 보면 두 도체 파이프의 매설위치가 아주 정확하게 찾아졌음을 알 수 있다. 재구성된 이미지들은 전체적으로 원형의 파이프 형태를 완전히 따르지 않고 지면에서 가까운 부분만을 나타내고 있다. 이는 이미지 구성을 위해 여러 산란 신호 중 1차 반사파만을 사용한 것과 레이더의 탐색 회수가 12회로 제한되었기 때문이다. 그리고 탐색 거리가 길지 않고 100 cm 정도 거리에 국한되어 있다는 것이 또 다른 원인이다. 본 논문에서는 기존의 마이그레이션(migration)과 같은 복잡한 과정을 거치지 않고도 비교적 매설물의 위치를 정확히 찾을 수 있음을 알 수 있었다^[2]. 이미지 복원에 걸린 시간은 대략 30~40초 였다.

V. 결 론

본 논문에서는 지하에 매설된 구조물의 위치파악과 이미지 복원을 위한 시간영역에서의 실시간 처리 방법을 제안하였다. 우선 WRELAX 알고리즘을 사용하여 전체 수신신호로부터 분리해 내기 어려운 1차 반사파를 추출할 수 있었다. 그리고 절대치 적분에 의한 신호 처리법을 이용함으로써 불규칙적인 지면굴곡에 대해서도 이미지 구성이 용이하였다. 또한 새롭게 제안한 전파 경로추적 알고리즘을 이용하여 지면과 레이더 간의 이격거리가 주는 효과를 정확히 고려할 수 있었다. 매설 구조물의 이미지는 모의 실험

여건상 레이더의 탐색 거리 제한으로 인하여 정확히 복원되지는 못하였지만, 지면 가까운 부분은 비교적 잘 복원되었다. 이와 함께 약 100 cm 정도의 짧은 탐색 거리로도 구조물의 정확한 위치 파악이 가능하며, 이미지 복원 소요시간도 짧아 현장에서 실시간 처리가 가능함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] D. J. Daniels, *Surface Penetrating Radar*, The Institution of Electrical Engineers, London, pp. 192-255, 1996.
- [2] Yilmaz, *Seismic Data Processing*, Society of Exploration Geophysicists, pp. 240-353, 1987.
- [3] J. M. Bourgeois and G. S. Smith, "A fully three-dimensional simulation of a ground-penetrating radar: FDTD theory compared with experiment," *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, vol. 34, no.1, pp. 36-44, Jan., 1996.
- [4] F. L. Teixeira and W. C. Chew, "Finite-difference time domain simulation of ground penetrating radar on dispersive, inhomogeneous and conductive soils," *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, vol. 36, no. 6, pp. 1928-1936, Nov., 1998.
- [5] R. Wu and J. Li, "Super resolution time delay estimation via MODE-WRELAX," *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, vol. 35, no. 1, pp. 294-306, Jan., 1999.
- [6] J. Fang and Z. Wu, "Generalized perfectly matched layer for the absorption of propagating and evanescent waves in lossless and lossy media," *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, vol. 44, no. 12, pp. 2216-2222, Dec., 1996.
- [7] F. L. Teixeira and W. C. Chew, "Perfectly matched layer and piecewise-linear recursive convolution for the FDTD solution of the 3D dispersive half-space problem," *IEEE Trans.*

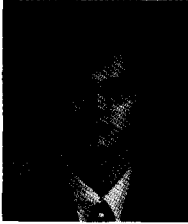
Magnetics, vol. 34, no. 5, pp. 2747-2750, Sept., 1998.

- [8] D. F. Kelley and R. J. Luebbers, "Piecewise linear recursive convolution for dispersive media using FDTD," *IEEE Trans. Antennas*

and Propagation, vol. 44, no. 6, pp. 792-797, Jun., 1996.

- [9] J. L. Melsa and D. L. Cohn, *Decision and Estimation Theory*, McGraw-Hill Book Company, pp. 21-26, New York, 1978.

김 동 호



1998년 2월: 경북대학교 전자공학과(공학사)
 2000년 2월: 경북대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
 [주 관심분야] 지하 탐사용 레이더, 전자파 역산란 해석, 휴대용 단말기 안테나 특성 해석

김 채 영



1976년 2월: 경북대학교 전자공학과(공학사)
 1978년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학석사)
 1990년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학박사)
 1985년 9월~1993년 2월: 미국

MIT 공대 연구과학자
 1979년 4월~1992년 9월: 경북대학교 전자공학과 전임강사-부교수
 1992년 10월~현재: 경북대학교 공과대학 전자·전기공학부 전자파 연구실 교수
 [주 관심분야] 이동통신 전파환경, 무선망 설계, 전자파의 인체영향, 전자파 이론 및 응용 등

이 승 학



1969년 3월 16일 생
 1996년 2월: 경북대학교 전자공학과(공학사)
 1998년 2월: 경북대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
 1998년 3월~현재: 경북대학교 대학원 전자공학과 박사수료

- [주 관심분야] 전자파 산란특성, 안테나 해석 및 설계, 원격 탐지, 전자파의 인체영향