

지하 탐사용 레이더를 이용한 매설된 구조물의 탐사

The Probing of Underground Structures Using Ground Penetrating Radar

김동호(D.H. Kim)
조평동(P.D. Cho)

기술기준연구팀 연구원
기술기준연구팀 책임연구원, 팀장

지하 탐사용 레이더를 이용하여 지하에 매설된 구조물의 위치를 파악하고 그에 따른 근사 이미지의 추출 방법을 제안하였다. 기본원리는 구조물에 의해 산란되어 수신 안테나로 유입되는 펄스신호의 지연시간과 크기를 측정하는 데 있으며, 측정의 실용성을 위하여 레이더 탐색경로에 따른 수신신호의 절대치 적분 방법을 사용하였다. 일반적으로 지하매질은 침투 주파수에 따라서 다양한 분산 및 손실 특성을 나타내는데, 이러한 매질 특성은 다항 Debye 모델을 이용하여 기술되었다. 3차원 전파(□□) 전파(□□)를 위한 시뮬레이션에는 FDTD(Finite Difference Time Domain) 방법을 사용하였다.

I. 서론

지표면 아래에 존재하는 전기적 특성의 불연속성을 탐사 과정에 이용하는 레이더를 지하 탐사용 레이더(Ground Penetrating Radar)라 한다. 지하 탐사용 레이더는 건축 구조물 비파괴 검사, 지하자원 탐사, 공사시 지하 매설 구조물의 사전 위치 파악으로부터 지뢰탐지, 불발된 폭발물 제거 등의 군사적 용도까지 그 활용 분야가 광범위하다. 이러한 활용 분야의 광범위성은 지하 탐사용 레이더가 가지는 탐색 혹은 검사의 비파괴성에 기인한다고 볼 수 있다 [1].

기본 원리는 송신 안테나로부터 방사된 펄스가 지하 매설 구조물에 산란되어 수신 안테나로 되돌아오는 전파 지연시간 및 펄스 크기의 측정에 있다. 일반적으로 지하 탐사용 안테나의 특성으로는 산란신호의 구분 및 추출이 용이하도록 자기공진을 억제하는 광대역 응답을 들 수 있다. 기술(既)된 원리 및

구조의 레이더를 이용하여 지하에 매설된 파이프 형태의 구조물 탐색에 초점을 맞추었다.

II. 지하 매질의 기술

◆ 지하 매질의 다항 Debye 모델

일반적으로 지하 매질은 침투 주파수에 따라서 서로 다른 분산 및 손실 특성을 나타내는데, 이러한 특성의 모델링을 위해서 매질의 수분 함유량에 따라서 서로 상이한 파라미터를 갖는 다항 Debye 모델을 사용하였다. 동작 주파수의 함수인 다항 Debye 모델식은 다음과 같다.

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

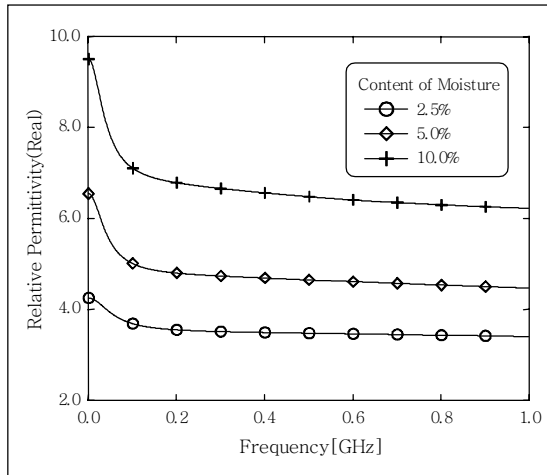
$$\chi(\omega) = \sum_{p=1}^N (\epsilon_p - \epsilon_\infty) / (1 + j\omega\tau_p) \quad (1b)$$

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 N 값을 조정함으로써 매질의 전기적 특성을 변화시킬 수 있다. 여기서는 식 (1a)의 비유전율을 관심 주파수 대역인 DC~1GHz에서의 실험치 유전율과 맞추기 위해 $N = 2$ 로 두었다[2]. 사용된 지하 매질의 파라미터가 <표 1>에 주어져 있다.

<표 1> 시뮬레이션에 사용된 다항 Debye 모델 파라미터

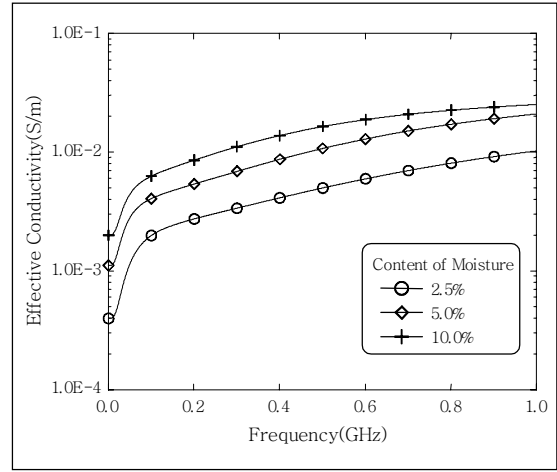
Moisture	ϵ_∞	σ (mS/m)	ϵ_1	ϵ_2	τ_1 (nsec)	τ_2 (nsec)
2.5%	3.20	0.397	3.95	3.50	2.71	0.108
5.0%	4.15	1.11	5.95	4.75	3.79	0.151
10.0%	6.00	2.00	8.75	6.75	3.98	0.251

<표 1>의 파라미터를 이용한 지하매질의 전기적 특성은 (그림 1) 및 (그림 2)와 같다.



(그림 1) 수분 함유량 및 주파수 변화에 따른 비유전율의 실수부 변화도

지하 매질에서 전파의 전파 모델로는 선형 절편 반복 컨벌루션(Piecewise Linear Recursive Convolution) 방법을 사용하였다[3]. 결과적인 지하 매질에서의 FDTD 표현식은 다음과 같다.



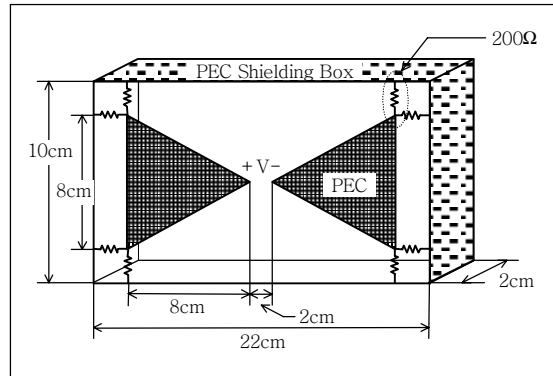
(그림 2) 수분 함유량 및 주파수 변화에 따른 실효 전도율의 변화도

$$E_x|_{i+1/2,j,k}^{n+1} = C_a \left\{ \left(\epsilon_\infty - \sum_{p=1}^N \xi_p^0 - \frac{\sigma \Delta t}{2\epsilon_0} \right) E_x|_{i+1/2,j,k}^n + \sum_{p=1}^N \Psi_{px}|_{i+1/2,j,k}^n + \frac{\Delta t}{\epsilon_0 \Delta} \left[H_z|_{i+1/2,j+1/2,k}^{n+1/2} - H_z|_{i+1/2,j-1/2,k}^{n+1/2} + H_y|_{i+1/2,j,k-1/2}^{n+1/2} - H_y|_{i+1/2,j,k+1/2}^{n+1/2} \right] \right\} \quad (2a)$$

$$E_y|_{i,j+1/2,k}^{n+1} = C_a \left\{ \left(\epsilon_\infty - \sum_{p=1}^N \xi_p^0 - \frac{\sigma \Delta t}{2\epsilon_0} \right) E_y|_{i,j+1/2,k}^n + \sum_{p=1}^N \Psi_{py}|_{i,j+1/2,k}^n + \frac{\Delta t}{\epsilon_0 \Delta} \left[H_x|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n+1/2} - H_x|_{i,j+1/2,k-1/2}^{n+1/2} + H_z|_{i-1/2,j+1/2,k}^{n+1/2} - H_z|_{i+1/2,j+1/2,k}^{n+1/2} \right] \right\} \quad (2b)$$

$$E_z|_{i,j,k+1/2}^{n+1} = C_a \left\{ \left(\epsilon_\infty - \sum_{p=1}^N \xi_p^0 - \frac{\sigma \Delta t}{2\epsilon_0} \right) E_z|_{i,j,k+1/2}^n + \sum_{p=1}^N \Psi_{pz}|_{i,j,k+1/2}^n + \frac{\Delta t}{\epsilon_0 \Delta} \left[H_y|_{i+1/2,j,k+1/2}^{n+1/2} - H_y|_{i-1/2,j,k+1/2}^{n+1/2} + H_x|_{i,j-1/2,k+1/2}^{n+1/2} - H_x|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n+1/2} \right] \right\} \quad (2c)$$

단, $C_a = 1/\left[\epsilon_\infty + \sum_{p=1}^N (\chi_p^0 - \xi_p^0) + \sigma\Delta t/2\epsilon_0\right]$ 이다. Δ 와 Δt 는 각각 공간 및 시간 단위격자 증가분을 의미하며, 여기에서는 $\Delta = \Delta x = \Delta y = \Delta z$ 로 두었다. 그리고 Courant 안정조건을 만족하도록 $\Delta t \leq \Delta/\sqrt{3}c$ 로 정하였다. 전파의 흡수를 위한 흡수경계조건은 모든 공간에 PML(Perfectly Matched Layer)을 사용하였고, 특히 지하매질에서의 전파 흡수를 위해서는 확장 좌표계(stretched coordinate)를 도입한 DPML(PML for Dispersive Media)을 이용하였다[4].

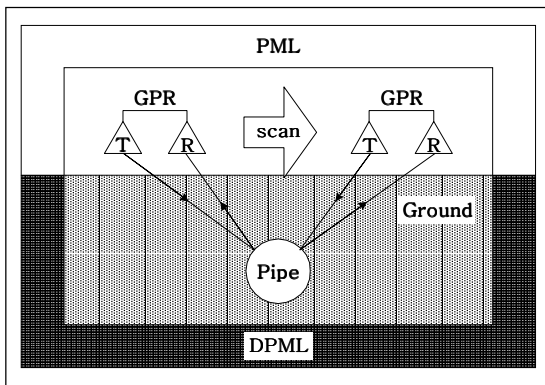


(그림 4) 저항 종단이 사용된 bow-tie 안테나 구조

III. 지하 탐사용 레이더의 동작원리

1. 레이더의 구성

사용한 지하 구조물의 탐색 구성은 (그림 3)에서와 같이 송·수신기 쌍으로 구성된 레이더가 일정한 간격으로 지면 위를 탐색(scan)하는 방법이다. 사용한 탐색 간격은 8cm이고, 지면과 레이더 이격거리는 4cm이며, 각 탐색 지점에서의 측정 소요시간은 21.0nsec이다. 그리고 송·수신 안테나의 급전점간 거리는 20cm이다.



(그림 3) 매설 구조물의 탐색도

여기서는 매설 구조물의 횡단 방향을 찾기 위한 레이더 탐색 과정은 생략하였으며, 시뮬레이션은 정확히 구조물을 횡단하는 경로에 대해서만 이루어졌다.

(그림 4)는 송·수신 안테나의 구조이다. 사용한 안테나는 bow-tie형인데 이는 펄스의 왜곡 방지가

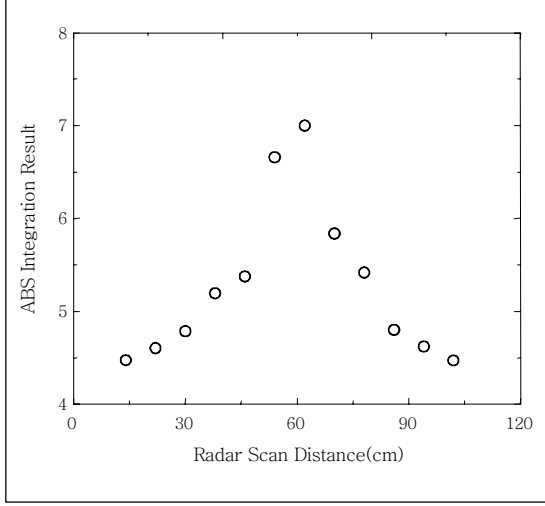
용이기 때문이다. 그리고 광대역의 송신 펄스를 얻기 위해 안테나 양쪽 날개 끝 부분을 저항(resistor)으로 종단시켰으며, 저항의 모델링에는 일반적인 수동소자 모델링 방법을 사용하였다[5]. 또한 지하로의 침투 전력을 높이기 위해 지면 방향을 제외한 나머지 부분을 금속으로 차폐시켰다. 안테나와 매설 파이프 등의 모든 구조물 모델에는 계단형 격자가 사용되었다.

2. 지연시간 측정 알고리즘

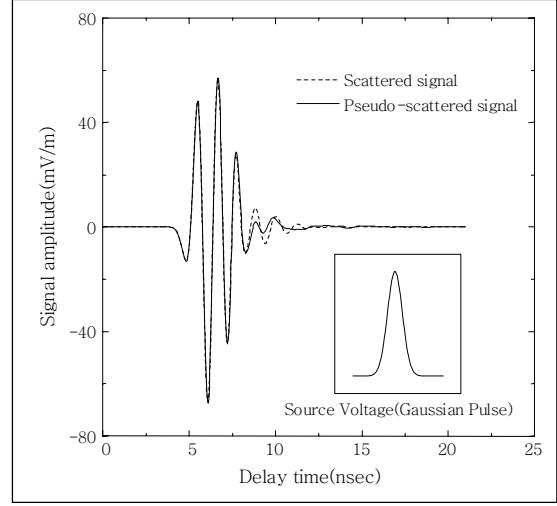
(그림 3)의 구조에서 수신기에 유입되는 신호는 크게 송신기에서 오는 직접파(V_d), 지면 반사파(V_r), 산란체에 의한 산란파(V_s) 그리고 잡음 등의 기타 신호(V_n)로 나누어 생각할 수 있다. 산란체가 없을 때의 총 수신 신호를 V_{i1} 이라 하고, 산란체가 있을 때의 총 수신 신호를 V_{i2} 라 하면 산란신호 V_s 를 측정하는 방법은 아래와 같다.

$$V_s \cong V_{i2} - V_{i1} \quad (3)$$

하지만 위의 방법은 현장에서 적용할 수 없으므로 여기서는 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 결과는 산란체와 레이더 간의 거리가 가장 가까울 때 최대값



(그림 5) 수신신호의 레이더 탐색 위치에 따른 절대치 적분 결과



(그림 6) 산란신호와 유사 산란신호의 비교

을, 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 적분 값을 준 점의 수신신호를 $y_{\min}(t)$ 라 하면, 유사 산란신호는 식 (4)로 부터 추출된다.

$$V_{pseudo}^i(t) = y_i(t) - y_{\min}(t) \quad (4)$$

$V_{pseudo}^i(t)$ 는 탐색 횟수 i 에 대한 시간영역의 유사 산란신호이다. (그림 5)는 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 68cm 지점에서의 적분결과가 가장 크게 나타났다.

(그림 6)은 식 (3)에 의한 산란신호와 식 (4)에 의한 유사 산란신호의 비교 그림이다. 인가 전압은 최대치가 100V, 펄스폭이 3.5nsec인 가우시안 펄스이다. 그림에서 8nsec 까지는 두 신호가 거의 흡사하다. 특히 1차 반사파가 위치하고 있는 5nsec 부근에서는 두 신호가 더욱 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 이미지 추출시 1차 반사파만이 사용되므로 새롭게 제안한 유사 산란신호 추출법을 사용하더라도 이미지 추출에는 아무런 문제가 없음을 알 수 있다.

지연시간 측정 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 다음처럼 표현된다[6].

$$y(t) = \sum_{i=1}^L \alpha_i s(t - \tau_i) + e(t) \quad 0 \leq t \leq T \quad (5)$$

여기서 α_i 과 τ_i 은 각각 크기 복원 계수와 지연시간이며, T 는 레이더의 1회 탐색 소요시간이다. 식 (5)의 주파수 영역 표현식은 다음과 같다.

$$Y(k) = S(k) \sum_{i=1}^L \alpha_i e^{j\omega_i k} + E(k), \quad k = -N/2, -N/2+1, \dots, N/2-1 \quad (6)$$

여기서 $\omega_i = -(2\pi\tau_i / NT_s)$ 이고, T_s 는 샘플링 시간이다. 식 (6)에서 미지수 α 와 ω 는 비선형으로 결합되어 있으며, 이는 결국 다음의 비선형 최소 자승법(Nonlinear least square)에 의한 미지의 파라미터 산출방법이 된다.

$$C_1(\{\alpha_i, \tau_i\}_{i=1}^L) = \sum_{k=-N/2}^{N/2-1} \left| Y(k) - S(k) \sum_{i=1}^L \alpha_i e^{j\omega_i k} \right|^2 \quad (7)$$

식 (7)의 최소화를 위한 행렬식을 구성하면 아래와

같다.

$$\mathbf{Y}_l = \mathbf{Y} - \sum_{i=1, i \neq l}^L \hat{\alpha}_i [\mathbf{S}\mathbf{a}(\hat{\omega}_i)] \quad (8)$$

여기에서

$\mathbf{a}(\omega_i) = [e^{j\omega_i(-N/2)} \ e^{j\omega_i(-N/2+1)} \ \dots \ e^{j\omega_i(N/2-1)}]^T$ 이고, $(\cdot)^T$ 는 전치행렬을 의미한다. 식 (8)을 이용한 미지수 α 와 ω 는 다음과 같은 방법으로 추출할 수 있다.

$$\hat{\omega}_l = \arg \left\{ \max_{\omega_l} \operatorname{Re}[\mathbf{a}^H(\omega_l)(\mathbf{S}^* \mathbf{Y}_l)]^2 \right\} \quad (9a)$$

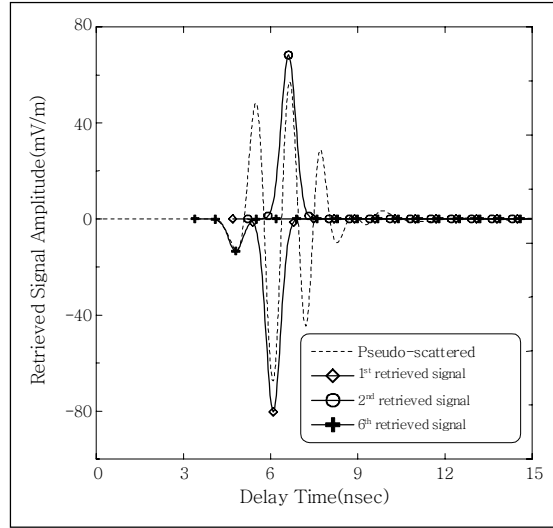
$$\hat{\alpha}_l = \frac{\operatorname{Re}[\mathbf{a}^H(\omega_l)(\mathbf{S}^* \mathbf{Y}_l)]}{\|\mathbf{S}\|_F^2} \Bigg|_{\omega_l = \hat{\omega}_l} \quad (9b)$$

단, $\operatorname{Re}(\mathbf{X})$ 는 \mathbf{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.

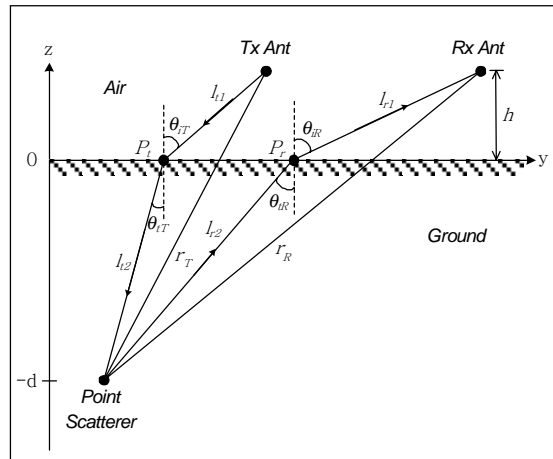
- 과정 1: $L=1$ 로 가정하고, 식 (9)를 이용하여 \mathbf{Y} 로부터 $\{\hat{\alpha}_l, \hat{\omega}_l\}_{l=1}$ 을 구한다.
- 과정 2: $L=2$ 로 가정하고, 과정 1에서 구한 $\{\hat{\alpha}_l, \hat{\omega}_l\}_{l=1}$ 을 식 (8)에 적용시켜 \mathbf{Y}_2 를 구하고, 다시 \mathbf{Y}_2 로부터 $\{\hat{\alpha}_l, \hat{\omega}_l\}_{l=2}$ 를 구한다. $\{\hat{\alpha}_l, \hat{\omega}_l\}_{l=2}$ 를 이용하여 \mathbf{Y}_1 을 재계산하고, 이를 이용하여 $\{\hat{\alpha}_l, \hat{\omega}_l\}_{l=1}$ 값을 수정한다.

위의 과정 1, 2를 반복하여 식 (7)의 C_1 이 설정된 허용 한계값 이하가 될 때까지 $\{\hat{\alpha}_l, \hat{\omega}_l\}_{l=1}^L$ 을 구한다. 매설 산란체에 의한 1차 반사파는 유사 산란신호 중 지연시간이 가장 짧으며 크기 복원계수 또한 비교적 큰 편이다. 따라서 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 측정 알고리즘으로 재구성한 것이 (그림 7)이다. 점선 부분이 유사 산란신호이고, 실선 부분이 지연시간 측정 알고리즘으로 재구성된 부분이다. 복원계수의 절대치가 가장 큰



(그림 7) 유사 산란신호로부터 지연시간 및 크기 복원계수 추출



(그림 8) 전파 경로 추적을 통한 새로운 이미지 구성법

신호부터 차례로 복원되고 있으며, 산란체에 의한 1차 반사파는 여섯번째로 복원되었음을 알 수 있다.

IV. 매설 구조물의 근사 이미지 추출 방법

새로운 전파경로 추적 알고리즘이 (그림 8)에 주어져 있다.

매설 깊이가 얇은 구조물을 탐색할 때는 지하 구조물의 정확한 위치와 형상 파악을 위해 지면과 레이더 간의 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.

$$l_1 = \frac{h}{\sqrt{1 - \sin^2 \theta_i}} \quad (10a)$$

$$l_2 = \frac{d}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2 \sin^2 \theta_i}} \quad (10b)$$

c 는 광속도이고, v 는 $z \leq 0$ 인 영역에서 전파의 속도이다. 식 (10)을 이용하여 (그림 8)에 보인 r_m 을 계산하면

$$r_m = 2dh + \frac{h^2}{1 - \sin^2 \theta_{im}} + \frac{d^2}{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2 \sin^2 \theta_{im}} + \frac{2dhv \sin^2 \theta_{im}}{c \sqrt{1 - \sin^2 \theta_{im}} \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2 \sin^2 \theta_{im}}} \quad (11)$$

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.

$$T_d = T_d^{Tx} + T_d^{Rx} = \left(\frac{l_{t1} + l_{r1}}{c}\right) + \left(\frac{l_{t2} + l_{r2}}{v}\right) \quad (12)$$

이미지 공간에서의 산란체 이미지 구성 방법으로는 2진 결정(Binary decision) 방법이 사용되었다[7].

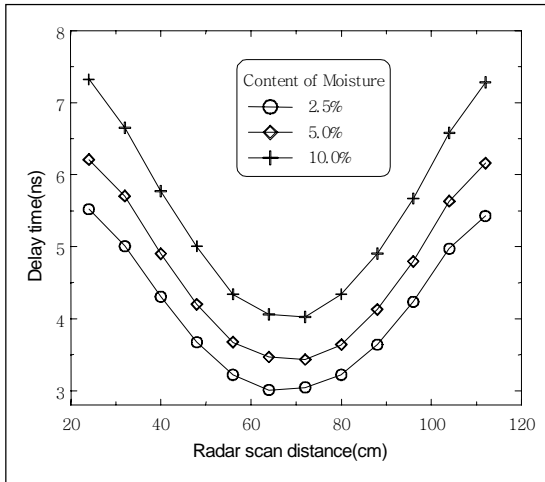
식 (11)과 (12)를 이용하여 이미지 공간의 각 셀에서 계산된 지연시간 T'_d 이 허용 오차 한계 내에서 지연시간 T_d 와 일치할 경우 그 셀을 “1[on]”로 두고, 그렇지 못한 경우를 “0[off]”으로 하여 산란체의 이미지를 구성하였다. 이미지 구성에는 다음식을 사용하였다.

$$I(y_j, z_k) = \sum_{m=1}^M I_m(y_j, z_k) + \begin{cases} 1, & \text{if } T'_d - T_{err} < T_d < T'_d + T_{err} \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (13)$$

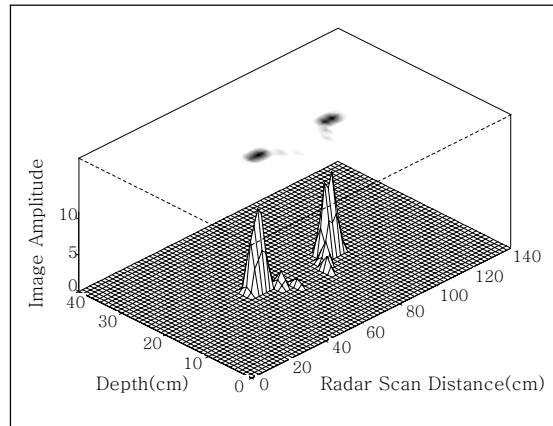
단, $I(y_j, z_k)$ 는 이미지 배열로서 구성된 이미지의 강도(intensity)이다. M 은 전체 레이더의 지하 탐색 횟수를 나타내고, T_{err} 은 최대 허용가능 오차 한계이다. T_{err} 값은 이미지 평면 한 셀에 대한 전파 시간으로 사용하였다. 셀의 크기는 이미지의 해상도(resolution)를 좌우하는 요소인데, FDTD 공간 분할 셀 크기의 1/3인 값을 사용하였다. 식 (13)은 송·수신점을 초점으로 하는 타원 궤적의 집합이며, 각 궤적간 교차영역의 이미지화를 위하여 이미지 배열 $I(y_j, z_k)$ 의 평균을 문턱값으로 사용하였다.

지연시간 측정 알고리즘을 이용하여 지하 수분 함유량에 따른 1차 반사파의 지연시간 차이를 보인 것이 (그림 9)이다. 매설 구조물은 깊이 20cm, 레이더 탐색 중심점 거리 68cm에 위치하고 있는 지름이 8cm인 도체 파이프 한 개이다. 그림에서 지하매질의 수분 함유량이 증가함에 따라서 지연시간이 길어지는 것을 볼 수 있다.

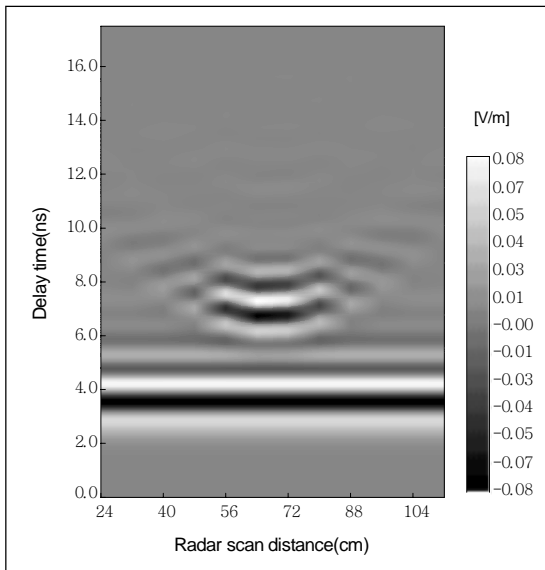
(그림 10)은 10%의 수분이 함유된 지하에 매설된 구조물에 의한 총 수신신호이다. 여기서 나타난 일직선은 지면에 의한 반사파의 영향이며, 매설 구조물은 (그림 9)에서와 동일하다. (그림 9)과 (그림 10)을 비교해 보면, 1차 반사파의 지연시간이 서로 다르다. 이는 가우시안 송신펄스의 첨두(peak) 부분이 시간축상의 원점에 위치하지 않기 때문이다. 일반적인 지하 탐사용 레이더에 수신되는 신호는 (그림 10)과 같은데, (그림 10)에서 (그림 9)의 지연시간을 찾아내기가 쉽지 않음을 알 수 있다.



(그림 9) 지하 수분 함유상태에 따른 도체 파이프 하나에 의한 지연시간 차이



(그림 11) 수분 함유량 5%인 지면 20cm 아래에 위치한 두 개의 도체 파이프 근사 이미지



(그림 10) 수분이 10% 함유된 지하에 매설된 도체 파이프 하나에 의한 총 수신신호

제안된 전파경로 추적 알고리즘으로 구성된 두 개의 도체 파이프 이미지는 (그림 11)과 같다. 수분이 5% 함유된 지하에 지름이 8cm인 동일 크기의 두 개의 파이프가 20cm 깊이에 매설되어 있다. (그림 8)의 좌표계에서 두 파이프의 y축 방향 매설 위치는 각각 $y = 48\text{cm}$ 와 $y = 88\text{cm}$ 이다. (그림 11)을 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 산란신호 중 1차 반사파만을 사용한 것과 레이더의 탐색 횟수가 12회로 제한되었기 때문이다. 그리고 탐색 거리가 길지 않고 100cm 정도 거리에 국한되어 있다는 것이 또 다른 원인이다. 이미지 복원에 걸린 시간은 대략 30~40초 였다.

V. 결론

지하에 매설된 구조물의 위치파악과 이미지 복원을 위한 시간영역에서의 새로운 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 시뮬레이션 여건상 레이더의 탐색 거리 제한으로 인하여 정확히 복원되지는 못하였지만, 지면 가까운 부분은 비교적 잘 복원되었다. 이와 함께 약 100cm 정도의 짧은 탐색 거리로도 구조물의 정확한 위치 파악이

가능하며, 이미지 복원 소요시간도 짧아 현장에서 실시간 처리가 가능함을 알 수 있었다.

참고 문헌

- [1] D.J. Daniels, *Surface Penetrating Radar*, The Institution of Electrical Engineers, London, 1996, pp. 192 – 255.
- [2] 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, Nov. 1998, pp. 1928 – 1936.
- [3] 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, June 1996, pp. 792 – 797.
- [4] 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, Sep. 1998, pp. 2747 – 2750.
- [5] 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, Jan. 1996, pp. 36 – 44.
- [6] R. Wu and J. Li, “Super Resolution Time Delay Estimation via MODE-WRELAX,” *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 35, No. 1, Jan. 1999, pp. 294 – 306.
- [7] J.L. Melsa and D.L. Cohn, *Decision and Estimation Theory*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1978, pp. 21 – 26.
- [8] K.S. Kunz and R.J. Luebbers, *The Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics*, CRC Press Inc., 1993, pp. 123 – 162.