

3차원 시추공 레이더 모델링

예병주* · 손호웅**

Three-Dimensional Borehole Radar Modeling

Byung-Ju Ye* and Howoong Shon**

ABSTRACT: Geo-radar survey which has the advantage of high-resolution and relatively fast survey has been widely used for engineering and environmental problems. Three-dimensional effects have to be considered in the interpretation of geo-radar data for high-resolution. However, there exists a trouble on the analysis of the three dimensional effects. To solve this problem an efficient three dimension numerical modeling algorithm is needed. Numerical radar modeling in three dimensional case requires large memory and long calculating time. In this paper, a finite difference method time domain solution to Maxwell's equations for simulating electromagnetic wave propagation in three dimensional media was developed to make economic algorithm which requires smaller memory and shorter calculating time. And in using boundary condition Liao absorption boundary condition instead of PML boundary condition was used to effectively reduce the effect of artificial boundary. The numerical result of cross-hole radar survey for tunnel is compared with real data. The two results are well matched. To prove application to three dimensional analysis, the results with variation of tunnel's incident angle to survey cross-section and the result when the tunnel is parallel to the cross-section were examined. This algorithm is useful in various geo-radar survey and can give basic data to develop data-processing and inversion program.

서 론

고주파수의 전자파를 이용하는 레이더 시스템은 군사적, 상업적 목적으로 많이 이용되어 왔다. 물리탐사 분야에서는 1980년대에 들어서면서 탐사기술과 전자기기의 발달로 지오레이더 (geo-radar)의 이용이 활발하여 졌다. 레이더탐사는 10 MHz~수 GHz 주파수 대역의 전자파를 이용하여 고해상의 자료를 얻을 수 있다 (손호웅 등, 1999; Fisher *et al.*, 1992; Shon *et al.*, 1992; Shon, 1996, Ulriksen, 1982; Yamamoto *et al.*, 1991). 레이더 탐사는 탐사형태에 따라 지표면에서 이루어지는 지표투과레이더 (Ground Penetrating

Radar; GPR)와 시추공을 이용한 시추공레이더 (Borehole Radar)로 구분할 수 있다.

시추공레이더 탐사는 지하 심부의 고해상 단면을 얻기 위해서 사용되는데, 이는 고주파의 전자파는 지하 매질에서 급격한 감쇠를 보여 깊은 심도까지의 탐사는 불가능하므로, 지하 심부의 고해상 단면을 얻기 위해서는 시추공을 통해 대상체에 가까이 접근시켜야 하기 때문이다. 3차원 공간에서 3차원의 형태를 갖는 대상체에 대해 탐사가 이루어지게 되며, 다른 탐사방법들보다 고해상의 자료를 얻는 레이더 탐사방법에서는 정확한 분석을 위해서 3차원 효과를 고려하여야 한다. 이를 위해서는 3차원 수치모델링을 통하여 어떠한 영향들이 있을 것인가를 고찰하여야 하나 대부분 2차원 가정에 의한 것이어서 3차원 레이더 수치모델링을 개발하게 되었다.

레이더 파는 파장이 매우 짧아 다른 영역의 탐사들과는 달리 세밀하게 격자를 나누어야 한다. 따라서 시간 샘플링 간격도 매우 작아질 수밖에 없다. 이 때문

* 군인공제회 (Military Mutual Aid Association, Seoul, 135-270, Korea)

** 배재대학교 토목환경공학과 (Department of Geotechnical and Environmental Engineering, Paichai University, Taejon, 302-735, Korea), E-mail: hshon@woonam.paichai.ac.kr

에 레이더 파의 수치모델링의 계산시에는 많은 메모리 용량과 계산시간이 많이 소요된다. 3차원 수치모델링을 위한 메모리 용량과 계산시간은 2차원 가정에 의한 수치모델링과는 비교할 수 없을 정도로 메모리 사용량이 증가하고, 계산시간이 길어지게 되므로 3차원 레이더 수치모델링의 가장 큰 어려움이라 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 3차원 레이더 수치모델링에서 메모리 사용량의 최소화와 계산시간을 줄이는 작업에 주안점을 두었다. 상대적으로 메모리 사용량이 많은 유한요소법 대신 시간영역 유한차분법을 사용하였으며, 경계조건도 Perfectly Matched Layer (PML; Berenger, 1993) 경계조건 대신 Liao 흡수경계조건을 사용하였다. Liao 경계조건은 흡수효율이 좋고, 메모리 사용량이 적으며, 인위적 경계면의 영향을 효과적으로 줄일 수 있다. 또한 공간미분의 근사에서도 분산성질을 잘 표현하기 위해서는 4차이상의 고차근사나 최적화 2차근사가 필요하다, 계산시간을 줄이고, 계산의 편의를 위해 단순 2차근사를 사용하였다. 본 수치모델링은 지표면, 단일시추공, 시추공간 어디에도 적용이 가능하다.

본 연구에서는 시간영역 탐사에 의한 시추공간 탐사에서 터널의 3차원적 효과를 고찰하였으며, 실제 자료와 비교하였다. 입사각에 따른 탐사결과 변화와 2차원 수치모델링으로는 불가능한 터널과 탐사단면이 평행할 때의 효과들을 고찰하였다. 지금까지는 2차원적인 이상적 신호형태를 기준으로 하여 지하공동 유무를 판별하고 있으나, 실제 상황에서는 3차원 효과에 의해 많은 변형이 이루어지고 있어 터널의 존재 여부 및 정확한 위치 판단에서 어려움을 겪게 된다. 따라서 이와 같은 터널의 3차원 효과를 고찰함으로써 터널의 여부와 위치에 대한 분석에 일조 하고자 한다.

알고리즘

맥스웰 방정식의 유한차분근사

선형, 등방성 매질에서의 전자기장은 다음의 맥스웰 방정식과 구성관계 (constitutive relation)의 지배를 받는다 (Boas, 1983; Jackson, 1977; Skolik, 1990).

$$\frac{\partial \mathbf{b}}{\partial t} + \nabla \times \mathbf{e} = 0 \tag{1}$$

$$\epsilon \frac{\partial \mathbf{e}}{\partial t} + \sigma \mathbf{e} - \nabla \times \mathbf{h} = -\mathbf{j}_i \tag{2}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{b} = 0 \tag{3}$$

$$\mathbf{b} - \mu \mathbf{h} = \mu_0 \mathbf{m}_i \tag{4}$$

여기서 \mathbf{b} : 자기속밀도 (magnetic flux density); \mathbf{e} : 전기장 강도 (electric intensity); \mathbf{h} : 자기장 강도 (magnetic intensity); σ : 전기전도도; ϵ : 유전율; \mathbf{m}_i : 자화율; \mathbf{m}_i : 자기밀도; \mathbf{j}_i : 전기밀도이며, 전기전도도, 유전율, 자화율은 시간에 따라 변하지 않는 것으로 가정한다. 식 (1)과 (2)의 초기조건과 경계조건은 다음과 같다.

$$\mathbf{e}, \mathbf{h} = 0, \frac{\partial \mathbf{e}}{\partial t}, \frac{\partial \mathbf{h}}{(\partial \mathbf{d})t} = 0 \quad (\text{for } t < 0^{-1})$$

$$\mathbf{e}(\mathbf{r}), \mathbf{h}(\mathbf{r}) \rightarrow 0. \quad (\text{for } |\mathbf{r}| \rightarrow \infty)$$

계산영역은 Δ 의 일정한 크기의 격자로 분할하였다. 격자상에서의 전기장과 자기장 값 계산은 Yee's staggered grid (1966)를 사용하였다. 이 격자에 의한 전자기장의 계산은 Fig. 1과 같이 격자선상에서 전기장을 계산하고, 면에서 자기장을 계산하는 방법이다.

공간미분 근사방법에는 4차이상의 고차근사나, 최적화된 2차근사 (Tam and Webber, 1993)등 분산성질을 잘 표현하는 근사방법이 있으나 계산량이 많을 뿐만 아니라 time stepping도 더 작게 분할하여야 하므로 계산시간이 매우 많이 소요되므로 경제성 확보를 위하여 계산의 편의를 위해 단순 2차근사를 이용하였다. 단순 2차근사를 식 (1)과 (2)에 적용시켜 b_x, e_y 에 대하여 유한차분식을 구성하면 다음과 같다. 시간미분은 중앙차분법을 사용하였다.

$$b_x^{n+\frac{1}{2}}\left(i, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}\right) = b_x^{n-\frac{1}{2}}\left(i, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}\right) \tag{5}$$

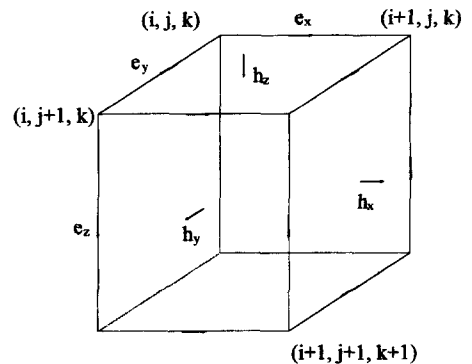


Fig. 1. The Yee staggered grid cube (Yee, 1966).

$$\begin{aligned}
& -\frac{\Delta t}{\Delta} \left[e_z^n \left(i, j+1, k+\frac{1}{2} \right) - e_z^n \left(i, j, k+\frac{1}{2} \right) \right. \\
& \left. - \left(e_y^n \left(i, j+\frac{1}{2}, k+1 \right) - e_y^n \left(i, j+\frac{1}{2}, k \right) \right) \right] \\
e_y^{n+1} \left(i, j+\frac{1}{2}, k \right) &= \frac{2\varepsilon_{i,j+\frac{1}{2},k} - \Delta t \sigma_{i,j+\frac{1}{2},k}}{2\varepsilon_{i,j+\frac{1}{2},k} + \Delta t \sigma_{i,j+\frac{1}{2},k}} e_y^n \left(i, j+\frac{1}{2}, k \right) \quad (6) \\
& - \frac{2}{2\varepsilon_{i,j+\frac{1}{2},k} - \Delta t \sigma_{i,j+\frac{1}{2},k}} \times \frac{\Delta t}{\Delta} \\
& \left[h_x^{n+\frac{1}{2}} \left(i, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2} \right) - h_x^{n+\frac{1}{2}} \left(i, j+\frac{1}{2}, k-\frac{1}{2} \right) \right. \\
& \left. - \left(h_z^{n+\frac{1}{2}} \left(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k \right) - h_z^{n+\frac{1}{2}} \left(i-\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k \right) \right) \right]
\end{aligned}$$

위의 식에서 물성을 나타내는 값은 유전율과 전기전도도이다. 자화율은 자성체가 아닌 경우에 있어서는 공기에서의 값과 큰 차이가 없으므로 $h=b/\mu_0$ 로 가정하였다. 매질의 물성을 나타내는 유전율과 전기전도도는 전기장 계산에 적용되므로, Yee's staggered grid에서는 전기장이 계산되는 격자 모서리의 중심에서 평균 유전율과 평균 전기전도도를 계산하여 식에 적용하였다. 격자 모서리에서의 평균 유전율 값은 다음의 식 (7)에서 구할 수 있고, 평균 전도도 값 $\sigma_{i,j+\frac{1}{2},k}$ 도 이와 유사하게 구할 수 있다.

$$\varepsilon_{i,j+\frac{1}{2},k} = \frac{1}{4} (\varepsilon_{i-1,j,k-1} + \varepsilon_{i,j,k-1} + \varepsilon_{i-1,j,k} + \varepsilon_{i,j,k}) \quad (7)$$

유한차분 식 (5)와 (6)의 수치모델의 값이 안정되기 위한 Δt 값은 Courant-Friedrichs-Lewy 안정조건에 의해 다음 조건을 만족해야 한다.

$$\Delta t < \frac{\Delta}{\sqrt{3} C_{\max}} \quad (8)$$

여기서 C_{\max} 는 계산영역의 매질 중에서 가장 빠른 속도를 가진 매질의 속도이다. 매질의 속도가 빠를수록 time-stepping 값인 Δt 의 값은 작아져야 하므로, 결과적으로 많은 계산시간이 소요되게 된다. 이와는 반대로 속도가 늦어지면 파장이 줄어들어 격자의 간격이 줄어들어야 하므로 격자수가 늘어 계산시간이 늘어나게 된다. 따라서 모델내의 매질들의 속도차가 큰 경우는 time-stepping과 격자의 안정성을 동시에 고려하게 되어 많은 계산시간과 메모리가 필요하게

된다.

Liao 흡수경계조건

유한차분법을 이용한 수치모델계산에서 사용되는 지하구조 모델은 실제의 무한공간이 아닌 유한영역에 국한되게 된다. 이 유한영역의 경계는 모델실험에서 원하지 않는 인위적 경계면에서의 반사파를 발생시킨다. 이런 인위적 경계면에서의 영향을 효과적으로 줄이기 위한 경계조건은 여러 가지가 있다.

PML 경계조건 (Berenger, 1993)의 은 매질과 경계에서의 임피던스차를 없애 반사가 일어나지 않도록 하는 것으로 비교적 인위적 반사파 흡수효과가 좋다. 그러나 PML 경계조건은 전기장, 자기장의 x, y, z 성분을 각각 전파하는 방향마다의 요소로 나누어 계산하여야 하므로 메모리 사용이 매우 클 수밖에 없다. 반면, Liao 흡수경계조건을 사용하면서 경계면상에서 송·수신 점들을 좀더 멀리 위치시키는 것이 메모리 사용이나, 인위적 경계면의 영향을 줄일 수 있다. Liao 흡수경계조건은 다른 흡수조건에 비해 고차근사를 포함하며, 모퉁이나 가장자리에도 쉽게 적용할 수 있다. Liao 흡수경계조건은 Newton의 역차분식을 이용하여 파동을 시간과 공간상으로 외삽시켜 경계면에서의 값을 미리 계산하여 인공적인 반사면을 없이 전파해 나가는 것과 같은 효과를 가지게 하는 것이다. 즉, 경계면에 입사한 파가 경계면으로 인식하지 못하게 하여 계속 전파해 나가는 효과를 가지게 하여 인공적인 반사파를 최소화하는 흡수방법이다. 경계면이 x_{\max} 에 있고, 필드 값 u 가 경계의 수직선상의 값이라고 하면, 경계에서의 외삽값 $u(t+\Delta t, x_{\max})$ 을 구하기 위해서는 시간과 공간에 대해 등간격 격자에서의 필드값에 대한 역차분 내삽식을 구성하여야 하고, 역차분 내삽식을 구성한 결과는 다음과 같다.

$$j = N \quad u_N = u[t - (N-1)\Delta t, x_{\max} - N\alpha c\Delta t]$$

$$j = 3 \quad u_3 = u[t - 2\Delta t, x_{\max} - 3\alpha c\Delta t] \quad (9)$$

$$j = 2 \quad u_2 = u[t - \Delta t, x_{\max} - 2\alpha c\Delta t]$$

$$j = 1 \quad u_1 = u[t, x_{\max} - \alpha c\Delta t]$$

여기서, α 는 비례값으로서 $1 \leq \alpha \leq 2$ 를 만족하는 범위의 값이다. 위의 식을 이용하여 $u_1 = u(t, x_{\max} - \alpha c\Delta t)$ 에서의 역차분식을 구하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}\Delta^1 u(t, x_{\max} - \alpha c \Delta t) &\equiv \Delta^1 u_1 = u_1 - u_2 \\ \Delta^2 u(t, x_{\max} - \alpha c \Delta t) &\equiv \Delta^2 u_1 = \Delta^1 u_1 - \Delta^1 u_2 \\ \Delta^3 u(t, x_{\max} - \alpha c \Delta t) &\equiv \Delta^3 u_1 = \Delta^2 u_1 - \Delta^2 u_2\end{aligned}\quad (10)$$

위 식을 종합하여 m 번째 역차분식의 일반식을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\Delta^m u(t, x_{\max} - \alpha c \Delta t) \\ = \sum_{j=1}^{m+1} (-1)^{j+1} C_{j-1}^m u[t - (j-1)\Delta t, x_{\max} - j\alpha c \Delta t]\end{aligned}\quad (11)$$

여기서 우리가 구하고자 하는 경계면에서의 외삽값 $u(t + \Delta t, x_{\max})$ 는 식 (12-1)과 같고, 여기에 식 (9)와 (11)을 대입하여 정리하면 식 (12-2)와 같이 시간적, 공간적으로 경계이전의 값으로부터 경계에서의 일반적인 외삽식을 얻을 수 있다.

$$u(t + \Delta t, x_{\max}) = u_1 + \Delta^1 u_1 + \Delta^2 u_1 + \Delta^3 u_1 + \dots \quad (12-1)$$

$$u(t + \Delta t, x_{\max}) = \quad (12-2)$$

$$\sum_{j=1}^m (-1)^{j+1} C_j^m u[t - (j-1)\Delta t, x_{\max} - j\alpha c \Delta t] \quad (12-2)$$

여기서 C_j^m 은 다음과 같다.

$$C_i^m = \frac{m!}{(m-j)!j!} \quad (13)$$

$\alpha=1$ 은 수직입사에 대한 반사만을 고려한 것이다. α 가 1보다 큰 값을 주게 되면 흡수경계면에 대한 수직입사가 아닌 입사파에 대한 인위적인 반사파를 줄일 수 있는 변수이다.

수치모델링의 안정성 고찰

시간영역 유한차분법 (finite difference in time domain; FDTD)을 이용한 수치모델링의 안정성에 크게 영향을 미치는 것은 격자의 크기와 time stepping이다. Time-stepping의 안정조건은 상기한 바와 같이 Courant-Friedrichs-Lewy 안정조건에 따른다. 격자의 안정조건은 수치분산오차를 줄여 계산값을 안정화시키기 위한 것이다.

맥스웰 방정식의 FDTD를 이용한 수치모델링에서는 수치파동의 위상속도가 실제 속도와 차이인 수치분산 오차는 파장과 격자내에서의 파의 진행방향, 그리고,

격자크기의 변화에 따른 것이다. 이와 같은 FDTD에서의 분산오차는 수치계산영역에서 파가 전파할수록 파의 지연과 위상의 변화가 축적되게 된다. 이런 파의 지연과 위상의 변화는 펄스파의 떨림과 수치오차에 의한 비등방성과 가굴절 등의 수치오차를 발생시킨다. 그러므로, 수치분산은 FDTD 모델링에서 중요한 요소가 된다.

3차원에서의 Yee 알고리즘에 의한 수치 분산관계식은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}\left[\frac{1}{c\Delta t} \sin\left(\frac{\omega\Delta t}{2}\right) \right]^2 \\ = \left[\frac{1}{\Delta x} \sin\left(\frac{k_x\Delta x}{2}\right) \right]^2 + \left[\frac{1}{\Delta y} \sin\left(\frac{k_y\Delta y}{2}\right) \right]^2 + \\ \left[\frac{1}{\Delta z} \sin\left(\frac{k_z\Delta z}{2}\right) \right]^2\end{aligned}\quad (14)$$

한편, 해석적인 분산관계식은 다음과 같다.

$$\frac{\omega^2}{c^2} = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 \quad (15)$$

수치분산관계식이 해석적인 값에 근접하기 위해서는 Δt , Δx , Δy , Δz 의 값이 0에 가까운 값이 되어야 한다는 것을 알 수 있으며, 이는 곧 time stepping과 격자의 크기가 작을수록 분산오차는 작아지게 된다는 것을 알 수 있다. 그러나, 격자나 time stepping의 값을 한없이 작게 할 수는 없다.

격자의 크기에 따른 위상속도를 전파각에 따라 도시한 것이 Fig. 2이다. 그림에서 보면 전파각이 45°에서 최대값 (실제값에 가장 근접한 값)이 되고 전파각이 0°와 90°에서 최소값 (가장 오차가 큰 값)이 됨을 알 수

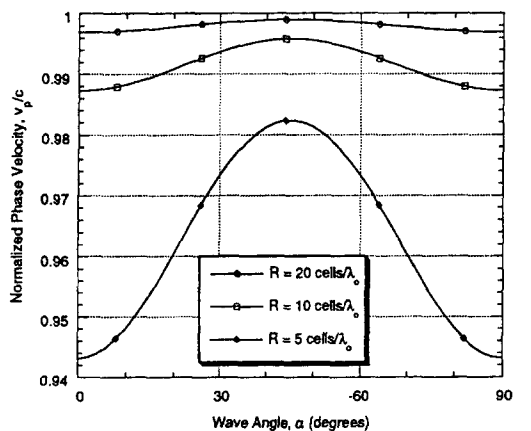


Fig. 2. Variation of phase velocity in FDTD algorithm according to the number of grid and propagation angle.

있다. 이는 Yee 알고리즘에서는 수치 위상속도가 비등방성의 성질을 가짐을 알 수 있고, 또한 격자의 크기가 커질수록 수치분산오차가 커짐을 확인할 수 있다. 파장당 20개의 격자를 가질 때는 최대 수치분산오차가 0.32%이다. 격자를 전파해 나갈수록 오차는 증가하게 되므로 파장당 격자수는 20개 이상은 되어야 한다는 것을 알 수 있다.

또한, Fig. 2에서 보면 파장당 격자수가 작아질수록 각 전파각마다 위상속도가 전체적으로 떨어짐을 알 수 있다. 이는 격자에 비해 너무 높은 주파수 성분은 그 격자에서는 더 이상 전파하지 않게 된다는 것을 의미한다. 즉, FDTD 알고리즘에서 Yee's staggered grid를 통한 파의 전파는 수치분산오차에 의한 수치적 저주파수통과 필터효과가 있다.

결과 및 고찰

탐사단면에 대한 터널의 입사각에 따른 효과

터널이 탐사단면에 수직이 아닌 경우에 탐사결과와 변형에 의해 분석이 어렵게 된다. 일반적으로 터널 수치모델은 2차원 가정에 의한 것이다. 그러나 입사각에 따른 변화고찰을 위해서는 3차원 수치모델링이 필수적이다. 본 연구에서 개발한 알고리즘을 이용하여 Fig. 3과 같은 모델에 대하여 수치모델실험을 하였다. Fig. 3은 수치모델의 터널을 중심으로 한 수평단면을 도시한 것이다. 매질은 신선한 화강암의 값인 상대 유전율

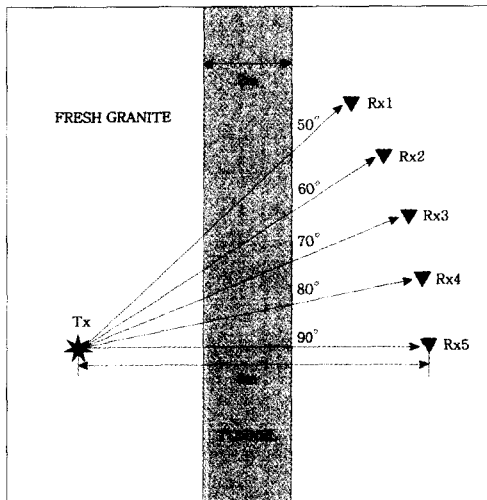


Fig. 2. Variation of phase velocity in FDTD algorithm according to the number of grid and propagation angle.

$\epsilon_r=9$, 비저항 $\rho=10,000 \Omega m$ 로 하고, 터널속 매질은 공기로서 상대 유전율 $\epsilon_r=1$, 비저항 $\rho=\infty$ 로 하였다. 각도효과만을 고려하기 위하여 송수신거리인 시추공간 거리는 8m로 일정하게 하였고, 송신기에서 터널중심까지의 거리는 4m로 하였다. 송신원은 Gaussian impulse를 사용하였고, 송신원의 주파수는 50 MHz로 하였다. 수신기의 위치는 입사각이 각각 90°, 80°, 70°, 60°, 50°가 되도록 배치하였다. 그리고, 수직탐사 거리는 10m로 하였다. 송신간격과 수신간격은 각각 0.5m로 하였다. 격자수는 배경매질의 파장당 20개로 하였다. 파장이 2m가 되므로 격자의 크기는 0.1m×0.1m×0.1m가 된다. 시간샘플링주파수는 공기층이 포함되어 있으므로 안정성을 위해서 6000 MHz로 하였다.

Fig. 4는 터널의 탐사단면에 대한 입사각이 90°인 송수신공 배열에 대한 탐사자료이다. (a)는 수신된 신호이고, (b)는 심도별 초동의 진폭변화를 표시한 것이다. 이 연구에서 개발된 3차원 레이더 수치모델링의 타당성을 검증하기 위하여, 모델과 같은 구조에서의 실

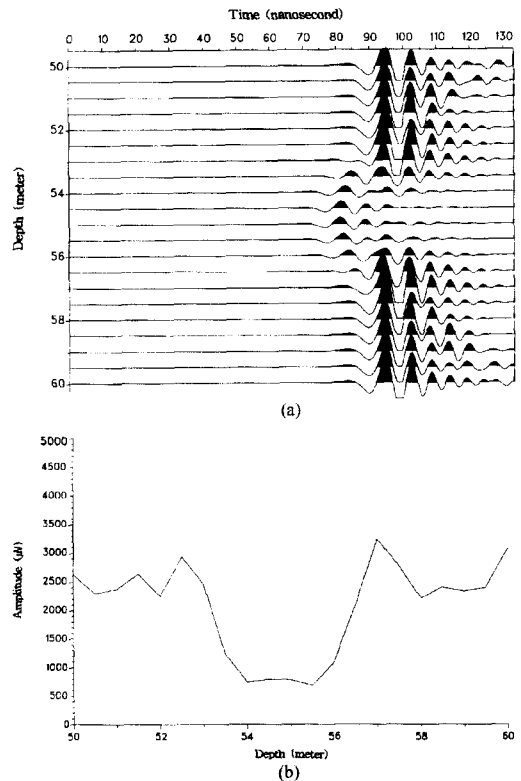


Fig. 4. The results of numerical modelling when tunnel's incident angle to survey cross-section is 90°. (a) wiggle trace, (b) amplitude plot.

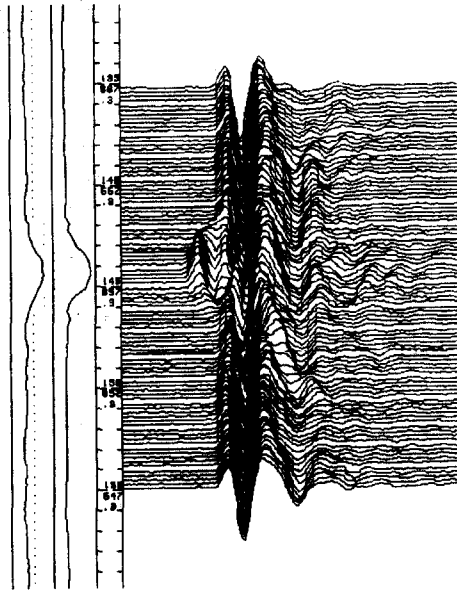


Fig. 5. The results of real survey data when tunnel's incident angle to survey cross-section is 90°.

제 데이터인 Fig. 5와 비교하였다. 터널을 통과하여 수신된 레이더파의 진폭의 감쇠와 초동이 빨라지는 현상, 터널에 의해 회절된 파의 양상을 잘 보여주고 있다. 실제 데이터와 분산성질에서 차이가 나고 있음을 알 수 있는데 이는 수치분산오차와 고차근사를 사용하지 않고 전통적인 방법에 의한 공간미분 근사를 사용하였기 때문이며, 송신원의 차이에 기인하는 것으로 보인다. 수치모델결과가 실제 데이터의 결과와 대체로 잘 일치함을 보여주고 있어 이 연구에서 개발한 3차원 레이더 모델링의 타당성을 검증할 수 있었다. 수신된 신호의 초동이 빨라진 정도는 터널을 통과하면서 빨라진 시간임을 알 수 있다. 레이더파가 터널을 지나가는 경로의 크기가 달라지고, 이에 따라 초동이 빨라지는 정도가 달라지므로 정확한 터널의 수평크기를 추정하기 위하여서는 탐사단면에 대한 입사각에 대한 정보가 있어야 한다는 것을 알 수 있다.

터널의 탐사단면에 대한 입사각이 80°, 70°, 60°, 50°인 송수신배열에 대한 수치모델링한 결과를 각각 Figs. 6, 7, 8, 9에 도시하였다. 각각의 (a)는 수신된 신호이고, (b)는 심도별 초동의 진폭변화를 표시한 것이다. 입사각이 80°, 70°, 60°, 50°로 바뀌어도 초동이 빨라지는 현상, 감쇠, 회절현상의 특징은 사라지지 않으나, 값의 변화가 있음을 알 수 있다. 전체적으로 입사각이 작아질수록 감쇠정도와 초동이 빨라지는 현상

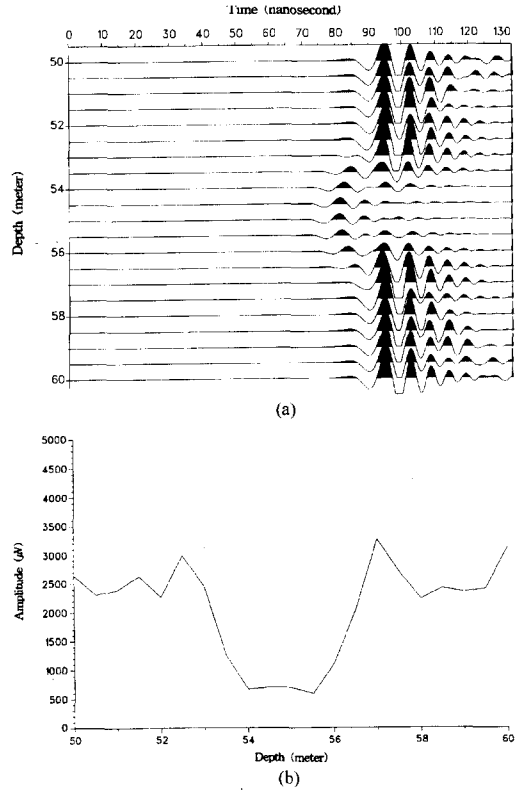


Fig. 6. The results of numerical modelling when tunnel's incident angle to survey cross-section is 80°. (a) wiggle trace, (b) amplitude plot.

이 커짐을 보여준다. 입사각이 작아질수록 초동이 빨라지는 것은 입사각이 작을수록 레이더파가 터널의 공기층을 통과하는 거리가 늘어나기 때문이며, 입사각이 작아지면 레이더파의 터널 경계층에 입사하는 각이 커지게 되고, 이에 따라 터널 경계면에서 반사되어 감쇠정도가 커지기 때문이다. 진폭변화 양상을 살펴보면 터널이 존재하는 인근 심도에서도 진폭에 변화가 있음을 알 수 있다. 이는 터널에 의한 회절과 간섭에 의한 영향에 의한 것이다. 또 주목할만한 것은 입사각이 90°, 80°인 경우는 터널의 중심부분에서의 감쇠정도가 가장 자리의 감쇠정도보다 감쇠의 양이 작아지고, 70°의 경우에는 터널의 중심부분에서의 감쇠정도와 가장자리의 감쇠정도가 거의 같아지고, 60°, 50°인 경우는 터널의 중심에서의 감쇠가 가장 크다는 것을 확인 할 수 있다. 이런 현상은 주파수영역 탐사결과에서 터널탐지의 특징적 요소로 볼 수 있는 현상과 연결하여 생각하여 볼 수 있다. 단일 주파수 탐사에서는 저주파수에서는 터널의 중심에서 가장 감쇠가 심하나, 고주파수로 올라

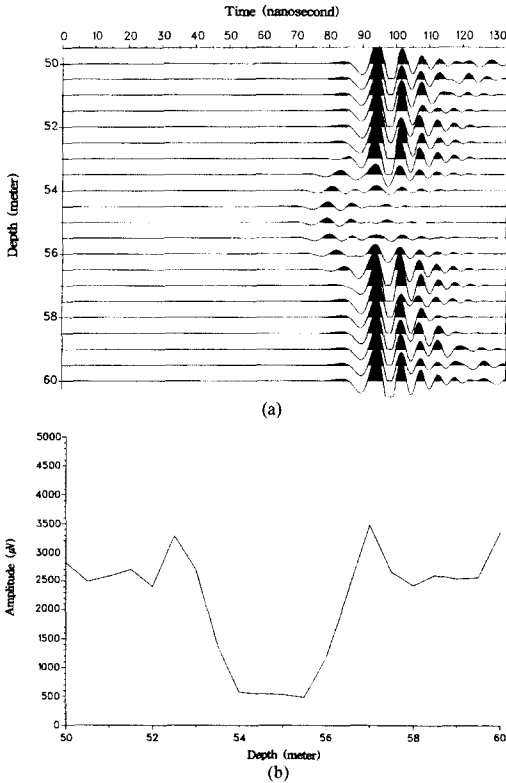


Fig. 7. The results of numerical modelling when tunnel's incident angle to survey cross-section is 70°. (a) wiggle trace, (b) amplitude plot.

가게 되면 오히려 터널의 양끝보다 터널중심에서의 감쇠가 적게 나타난다. 이와 같은 결과로 볼 때 터널의 입사각이 작아질수록 파의 분산현상이 커져 주주파수 대역이 저주파수대역으로 간다고 볼 수 있다. 입사각이 더욱 작게 되면 지금까지의 영향과는 다른 형태의 영향이 나타나게 된다. 즉, 터널을 통과해서 오는 직접파보다 터널을 통해서 전파되어 온 파가 더 빨리 도착하게 된다. 이런 경우에는 터널을 통해서 전파되어온 파가 경로에서는 직접파보다 멀지만 전파시간이 보다 적게 걸릴 때 나타나는 현상이다. 이때 먼저 도착하는 터널을 통과한 파는 주위 암질의 직접파보다 감쇠의 정도가 오히려 적게 된다. 이는 공기 중에서 감쇠가 거의 없기 때문에 암석을 통과하는 거리가 짧은 터널을 따라 도착한 파가 감쇠가 적게 된다. 터널을 통과한 파가 빨리 도착하는 정도는 시추공간의 거리와 입사각에 따라 달라지게 된다. 시추공간 거리가 짧고 입사각이 작을수록 초동이 도착하는 시간은 빨라지게 된다. 이것은 터널을 통과하는 거리가 길수록 시추공이

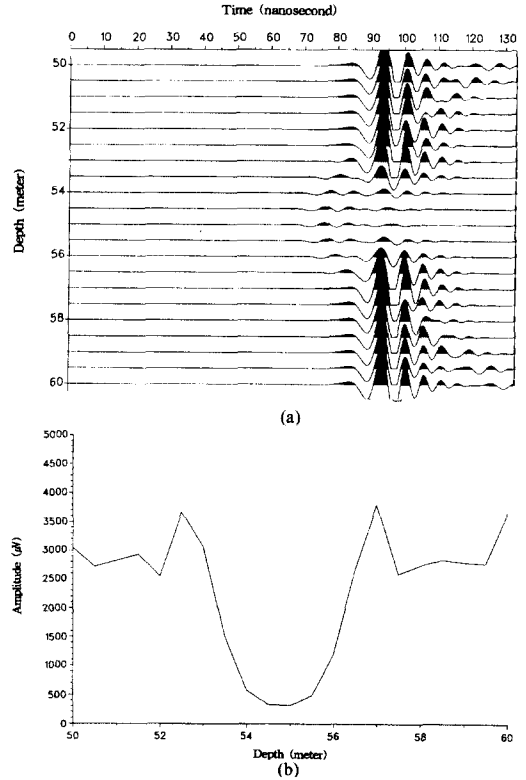


Fig. 8. The results of numerical modelling when tunnel's incident angle to survey cross-section is 60°. (a) wiggle trace, (b) amplitude plot.

가 가까울수록 굴절파의 도착시간은 빠르게 된다. 이런 현상은 터널내부가 공기와 같이 전자파의 전파속도가 배경매질보다 빠를 때 나타나는 현상으로서, 다음의 터널이 탐사단면에 평행한 경우에 터널이 탐사단면에 가까이 있을 경우와 동일하다.

탐사구간에 평행하게 위치한 터널의 효과

탐사구간에 평행하게 위치한 터널의 효과고찰을 위하여 Fig. 10과 같은 모델을 구성하여 수치모델링을 실시하여 실제 데이터와 비교하였다. 탐사구간의 거리는 7m이고 터널까지의 거리는 3m이다. 배경매질과 터널내의 매질은 위의 경우와 동일하게 구성하였다. Fig. 10과 같이 터널에 평행하게 위치한 탐사구간에 대한 수치모델의 결과는 Fig. 11에 도시하였으며, 실제 탐사 결과는 Fig. 12에 도시하였다. 수치모델결과와 실제 탐사결과 모두 반사파의 영향을 보이고 있으며, 단일 시추공 탐사에서 터널신호인 쌍곡선형태의 반사파가 포

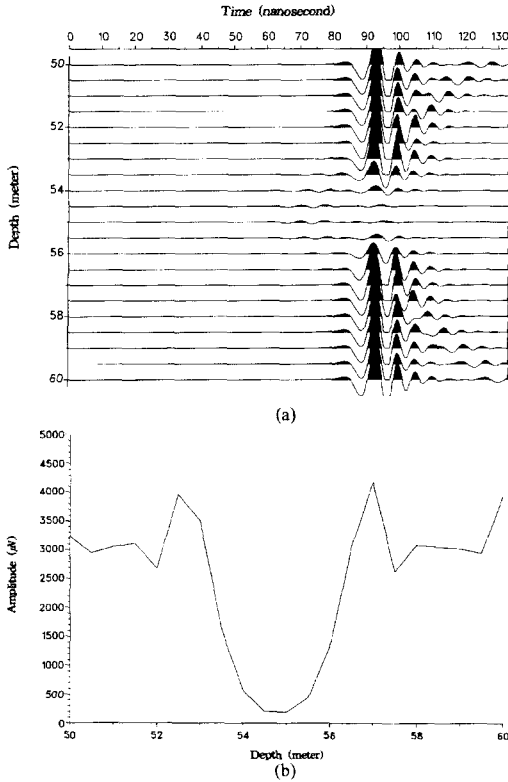


Fig. 9. The results of numerical modelling when tunnel's incident angle to Survey cross-section is 50°. (a) wiggle trace, (b) amplitude plot.

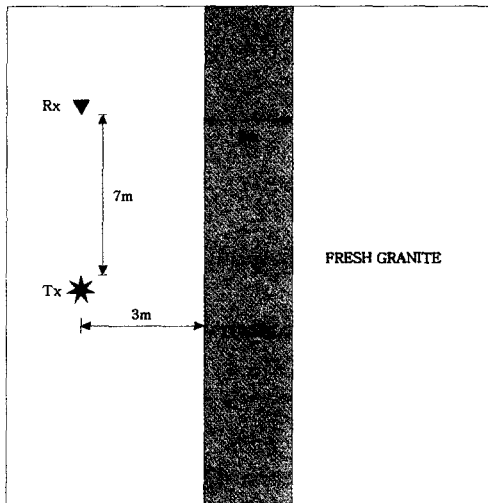


Fig. 10. The cross-section of model for studying the effect of tunnel when tunnel is parallel to the cross-section.

차됨을 알 수 있다. 이는 단일 시추공 탐사에서는 시추공을 따라 수직으로 송수신기가 배열되어 탐사되는

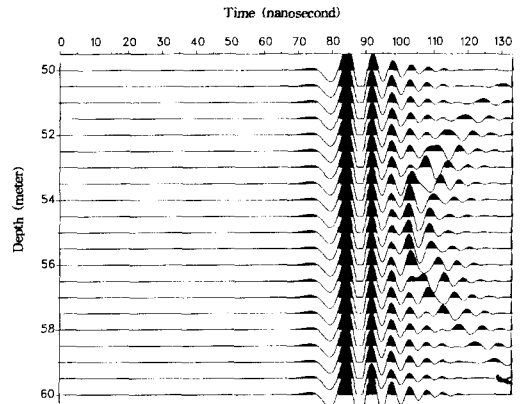


Fig. 11. The results of numerical modelling when tunnel is parallel to the cross-section.

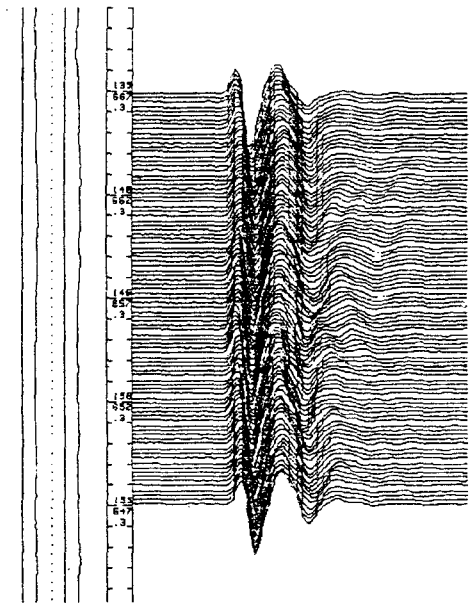


Fig. 12. The results of real survey data when tunnel is parallel to the cross-section.

것이고, 시추공간 탐사에서는 수평으로 배열되어 탐사되는 차이만 있을 뿐 포착되는 반사파 양상에는 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 이상에서 보듯이 수치모델결과와 실제 탐사결과가 일치함을 볼 수 있었고 이를 통하여 수치모델의 타당성을 검증할 수 있었다. 또한 직접 시추공간을 지나가지 않더라도 반사파와 같은 이차장을 통한 분석이 가능함을 말해 주고 있다. 그러나, 이와 같이 단일시추공과 같은 신호형태가 나오는 현상은 시추공간의 거리와 터널이 시추공간에서 떨어진 거

리의 비에 따라 양상은 크게 달라지게 된다. 우선 시추공간의 거리가 너무 멀게 되면 반사파와 같은 이차장을 포착하기가 어려워지게 되고, 터널이 시추공간 탐사거리에 비해 가까이 있으면 배경매질을 통과한 직접파보다 터널을 통해 전파된 굴절파가 더 빨리 포착되게 된다. 시추공간 탐사에서 이와 같은 현상이 나타나는 것은 터널의 입사각이 적을 때와 마찬가지로 터널의 내부물질인 공기가 암석에 비해 파의 전파속도가 매우 빠르고, 터널이 수평적인 형태를 가지기 때문이다. 만일 수직형태 터널이라면 단일시추공 탐사에서 이런 현상이 더욱 강하게 나타나게 될 것이다.

결 론

지하공간 개발과 더불어 지하 심부의 정밀탐사를 위한 시추공 레이더 탐사의 수요가 점차 늘어나고 있다. 레이더 탐사의 수치모델링의 대부분은 2차원 가정에 의한 모델링이었다. 그러나 정밀탐사가 요구되는 레이더 탐사에서 3차원적 효과를 고려하지 못하여 분석상에 많은 어려움을 가져왔다. 이에 탐사체의 3차원 효과를 고려하기 위해 3차원 레이더 탐사 수치모델링을 FDTD를 이용하여 개발하였다.

레이더 모델링은 파의 전파인 파동현상과 분산현상을 모두 포함해야 하므로 일반적으로 분산현상만을 다루는 EM모델링에 비해 많은 메모리를 사용하게 된다. 또한 계산할 양이 방대하여 계산시간이 많이 소요된다. 이를 극복하여 경제적이고 실용적인 프로그램 개발을 위하여 흡수효율이 좋으나 메모리 사용량이 커지는 PML 경계조건 대신 Liao 경계조건을 사용하여 메모리 사용과 효율을 증대시키고, 인위적 경계면의 영향을 효과적으로 줄일 수 있었다. 또한 분산현상을 잘 나타내기 위해서는 맥스웰 방정식의 공간 차분근사에 있어서 고차근사나 최적화된 2차근사를 사용하는 것이 좋으나, 계산시간의 절약하고, 계산의 편의를 위해 단순 2차근사를 사용하였다.

본 연구에서 개발된 프로그램을 이용하여 나온 수치결과와 실제 탐사결과가 잘 일치하는 것을 확인하였다. 터널탐지에 있어서 3차원 효과를 고찰하기 위하여 시추공간 탐사에서 탐사단면에 대한 터널의 입사각도에 따른 탐사결과와 비교와 탐사단면에 평행한 터널이 탐사결과에 미치는 영향에 대하여 고찰하여 보았다. 터널의 탐사단면에 대한 입사각이 작아질수록 초동의 빨라짐 현상은 커지고, 터널을 통과하여 수신된 신호의 진폭은 작아지는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 터널

의 입사각이 작아질수록 터널을 지나는 경로가 커져 초동이 빨라지고, 레이더파의 터널 경계면에 대한 입사각이 커져 반사되는 양이 커져 그만큼 투과량이 줄어들어 수신된 신호의 진폭이 크게 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 그러나, 입사각이 아주 작아지게 되면 터널을 통과하여 오는 굴절파가 직접파보다 빨라지면서 오히려 진폭이 커지는 현상도 나타나게 된다. 또한, 탐사단면에 평행하게 위치한 터널은 반사파의 형태로 나타나게 됨을 수치모델링과 실제탐사에서 확인할 수 있었다. 이는 탐사단면을 지나지 않는 터널도 탐지 가능하다는 것을 뜻하지만, 이런 양상은 터널이 탐사단면에서의 거리에 따라 양상이 달라지게 된다.

이상과 같이 3차원 수치모델링에 대하여 그 타당성을 검증할 수 있었고, 또한 터널이 시추공간 레이더 탐사에 미치는 3차원적 효과를 고찰하는데 이용하여 적용성도 확인할 수 있었다.

본 알고리즘은 지표투과 레이더 탐사의 여러 분야에 널리 적용될 수 있으며 특히 3차원 효과를 고찰할 수 있으므로 현장자료 해석의 정밀도가 높아져 탐사자료의 이용효율이 증대되고, 자료처리와 역산프로그램 개발을 위한 기본자료의 제공에 크게 기여할 수 있을 것이다.

사 사

본 연구는 학술진흥재단 기초과학연구소 연구지원(BSRI-99-5419) 및 한국과학재단의 연구지원(98-0703-02-01-3)에 의해 이루어졌다. 본 연구에 많은 조언을 하여준 미국 University of Miami의 Tokuo Yamamoto교수에게 감사를 표하며, 자료획득에 도움을 준 육군본부 탐지과 관계자 및 건설적인 심사의견과 내용수정을 하여 주신 한국자원연구소의 김정호 박사께 감사를 표한다.

참고문헌

- 설순지 (1995) 지표투과 레이더의 송신파형 및 모형반응 계산에 관한 연구. 석사학위논문, 서울대학교.
 손호용, 김지수, 송영수, 윤왕중, 김인수, 서만철, 김기영, 조인기 (1999) 지반환경물리탐사. 시그마프레스, 716p.
 이영균 (1997) 주파수 의존성을 고려한 지표투과 레이더 모형반응 계산. 석사학위논문, 서울대학교.
 김정호, 정승환, 조인기, 전정수 (1991) Radar 단층촬영법에 의한 석재재질 평가연구. KR-91-2C-3, 한국자원연구소.
 Berenger, J.P. (1993) A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves. Jour. Comp.

- Phys., 114, 185-200.
- Boas, M.L. (1983) *Mathematical Methods in the Physical Sciences* (2nd Ed.). John Wiley & Sons, 816p.
- Carcione, J.M. (1996) Ground-penetrating radar-wave theory and numerical simulation in lossy anisotropic media. *Geophysics*, 61, 1664-1667.
- Fang, J. (1995) Generalized perfectly matched layer-an extension of Berenger's perfectly matched layer boundary condition. *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, 5, 12.
- Fisher, E., McMechan, G.A. and Annan, A.P. (1992) Acquisition and processing of wide aperture ground penetrating radar data. *Geophysics*, 57, 495-504.
- Jackson, J.D. (1977) *Classical Electrodynamics*. John Wiley & Sons.
- Powers, M.H. (1996) Modeling GPR response to 2.5D dispersive media on your PC. *Int'l Conf. Ground Penetrating Radar '96*, 155-159.
- Sato, M. (1991) Analysis of a borehole radar in cross-hole mode. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 29.
- Shon, H. (1996) Application of Ground Penetrating Radar for Archaeological Monuments. *Econ. Environ. Geol.*, 29, 745-752.
- Shon, H. and Yamamoto, T. (1992) Simple data processing procedures for seismic section noise reduction. *Geophysics*, 57, 1064-1067.
- Skolnik, M.I. (1990) *Radar Handbook*. McGraw-Hill Book Co.
- Taflove, A. (1995) *Computational electrodynamics-The finite difference time-domain method*. Artech House Boston · London.
- Tam, C.K.W. and Webb, J.C. (1993) Dispersion-relation-preserving finite difference schemes for computational acoustics. *Jour. Comp. Phys.*, 107, 262-281.
- Ulriksen, C.P.F. (1982) Application of impulse radar to civil engineering. Thesis Lund Univ, Sweden.
- Wang, T. and Tripp, A.C. (1996) FDTD simulation of EM wave propagation in 3-D media. *Geophysics*, 61, 110-120.
- Yamamoto, T., Shon, H. and Goodman, D. (1991) High resolution subbottom imaging using a reflection system: Part I-seismic/radar section interpretation by data transformation. *IEEE Oceans*, 425-429.
- Yee, K.S. (1966) Numerical solution of initial boundary problems involving Maxwell's equations isotropic media. *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, AP-14, 4, 302-309.

1999년 11월 17일 원고접수, 2000년 1월 12일 게재승인.