

지표레이다 자료에 대한 회절지오토모그래피의 적용성 연구*

김근영¹⁾ · 신창수¹⁾ · 서정희¹⁾

Application of Diffraction Tomography to GPR Data

Kim, Geun-Young, Shin, Changsoo and Suh, Jung Hee

요 약 : 회절지오토모그래피는 정량적으로 고 분해능의 지하구조를 구하는 영상화 기법이다. 일반적으로 회절지오토모그래피는 시추공-시추공 자료의 영상단면을 구하는데 적용된다. 본 연구에서는 일반적인 지표레이다 탐사자료로부터 고 분해능의 지하구조를 영상화하는 회절지오토모그래피 알고리즘을 구성하였다. 개발된 알고리즘을 유한차분 모형응답자료에 적용하여 적용조건, 적용한계 등을 살펴보았다. 역산 매개변수들(영상화 주파수의 개수, 평활화 계수, 주파수 영역)을 약산란 가정에 부합하는 고립형 대상체로부터 추정하였다. 또한 약산란 가정에 위배되는 모형에 적용하여 알고리즘의 유용성을 확인하였다.

Abstract : Diffraction tomography (DT) is a quantitative technique for high resolution subsurface imaging. In general DT algorithm is used for crosswell imaging. In this study high resolution GPR DT algorithm which is able to reconstruct high resolution image of subsurface structures in multi-monostatic geometry is developed. Developed algorithm is applied to finite difference data and its criteria of application and its limit are studied. Inversion parameters (number of imaging frequency, regularization factor, frequency range) are deduced from isolated weak scattering model. And the usability of the algorithm is proved by applying to models which break the weak scattering approximation.

Keywords : 회절토모그래피, 고분해능, GPR

서 론

수십-수백 MHz의 전자기파를 송신원으로 사용하는 지표레이다 탐사는 탐사가 간편하고 그 자료의 분해능이 높아 지하 매설관 탐지, 침출수 탐지 등의 공학 및 환경적 목적의 천부탐사에 널리 이용되는 탐사기법이다. 지표레이다 자료의 해석은 대역통과필터, dewowing 등 간단한 자료처리후 레이더그램으로부터 육안으로 탐사대상체를 파악하는 방법이 주로 행해지고 있다. 이러한 접근방법으로는 탐사대상체의 크기와 위치를 정확히 알기 어려우며 탐사대상체가 여러개 있을 경우 파의 중첩으로 그 해석이 어려워진다. 따라서 보다 정확한 해석을 위해서는 대상체의 위치와 모양을 구할 수 있는 빠르고 간편한 자료처리방법이 요구된다.

탐사 대상체의 물성, 모양, 위치를 구하는 정량적 자료처리 기법중 하나인 회절지오토모그래피는 선형화한 근사를 사용하여 빠른 계산속도와 높은 분해능의 영상을 재구성하여 시추공-시추공 탐사 자료처리에 널리 적용되고 있다. 그러나 기존의 회절지오토모그래피 알고리즘은 공통 송신점 탐사를 기반으로 하므로 공통 오프셋 탐사가 주로 행해지는 지표레이다 탐사에는 그 적용이 어렵다는 문제점을 안고 있다. 최근들어 이런 한계를 극복하기 위한 다양한 연구가 이루어지고 있

으며, Molyneux(1993) 등은 monostatic 탐사(공통 오프셋 탐사)에 대한 회절지오토모그래피 알고리즘을 개발하여 이론해를 통해 자체 검증하였으며 Witten(1994)은 이를 매설관 탐사 자료에 적용한 바가 있다. 그러나, 이 알고리즘은 균질파(homogeneous wave)만을 고려해 분해능이 낮다는 문제를 지니고 있다. 한편, Deming(1997)은 다중주파수에 대하여 소멸파(evanescent wave)와 송수신원의 근접장 효과를 고려한 전자기파 산란 모형에 평활화 가역산(regularized pseudo inverse operation)을 이용하여 해석적으로 그 역해를 구하는 역산 연산자를 개발하였으나 이의 실제 적용성과 그 적용 한계 등을 제시하지 못하였다.

본 연구에서는 이 연산자를 이용하여 실제자료에 적용 가능한 알고리즘을 구성하였으며 이를 유한차분자료(이영균, 1997)에 대하여 그 한계, 적용 조건(영상화 주파수 영역, 영상화 주파수의 개수, 평활화 계수), 적용 가능성을 살펴보았다.

이 론

지하 매질을 전파하는 전자파의 파동 방정식은 맥스웰 방정식을 만족한다.

*1998년 4월 15일 접수

1) 서울대학교 자원공학과(Department of Mineral & Petroleum Engineering, Seoul National University)

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}) - \omega^2 \epsilon(\mathbf{r}) \mu(\mathbf{r}) \mathbf{E}(\mathbf{r}) = i \omega \mu(\mathbf{r}) \mathbf{J}(\mathbf{r}) \quad (1)$$

- \mathbf{E} : 전기장의 세기(electric field intensity)
- \mathbf{J} : 전류 밀도(electric current density)
- $\epsilon(\mathbf{r}, \omega) = \epsilon'(\mathbf{r}, \omega) + i \sigma(\mathbf{r}, \omega) / \omega$: 유전율(permittivity)
- ϵ' : effective permittivity
- μ : 투자율(magnetic permeability)
- σ : 전기 전도도(conductivity)

균질한 매질 내에 불균질체가 존재할 때 전체 전자장은 입사장과 불균질체에 의해 발생한 산란장의 합으로 나타낼 수 있으며 다음의 Lippman-Schwinger 방정식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(\mathbf{r}, \omega) &= \mathbf{E}_{inc}(\mathbf{r}, \omega) + \mathbf{E}_{sca}(\mathbf{r}, \omega) \\ &= \mathbf{E}_{inc}(\mathbf{r}, \omega) - k_0^2(\omega) \int d^3 r' \bar{\mathbf{G}}(\mathbf{r} - \mathbf{r}', \omega) \cdot \\ &\quad \mathbf{E}(\mathbf{r}', \omega) \mathbf{O}(\mathbf{r}', \omega) \end{aligned} \quad (2)$$

- \mathbf{E}_{inc} : 입사장,
- \mathbf{E}_{sca} : 산란장 $k_0(\omega) = \omega \sqrt{\epsilon_0(\omega) \mu_0}$: 균질한 배경 매질의 복소파수
- $\epsilon_0(\omega)$: 배경 매질의 복소 유전율,
- μ_0 : 배경 매질의 투자율,
- $\bar{\mathbf{G}}$: 배경 매질에서의 그린 다이아드

$\mathbf{O}(\mathbf{r}, \omega)$ 는 회절지오토모그래피에서 구하는 목적함수(object function)로써 아래와 같이 정의 된다.

$$\mathbf{O}(\mathbf{r}, \omega) = 1 - \frac{\epsilon(\mathbf{r}, \omega)}{\epsilon_0(\omega)} \quad (3)$$

$\mathbf{E}_{inc} \gg \mathbf{E}_{sca}$ 이라는 Born 근사에 의해 산란장은 다음과 같다

$$\mathbf{E}_{sca}(\mathbf{r}, \omega) = -k_0^2(\omega) \int d^3 r' \bar{\mathbf{G}}(\mathbf{r} - \mathbf{r}', \omega) \cdot \mathbf{E}_{inc}(\mathbf{r}', \omega) \mathbf{O}(\mathbf{r}', \omega) \quad (4)$$

그런 다이아드의 평면파 확장식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{G}}(\mathbf{r} - \mathbf{r}', \omega) &= \frac{i}{8\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d^2 \mathbf{K}}{\gamma(\mathbf{K}, \omega)} \\ &\quad \left[\bar{\mathbf{I}} + \frac{\mathbf{k}^+(\omega) \mathbf{k}^+(\omega)}{k_0^2} \right] e^{i\mathbf{k}(\omega) \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}')} \end{aligned} \quad (5)$$

$\mathbf{K} = k_x \hat{x} + k_y \hat{y}$ 공간 주파수

$$\gamma(\mathbf{K}, \omega) = \begin{cases} +\sqrt{k_0^2 - \mathbf{K} \cdot \mathbf{K}}: \sigma m(\sqrt{k_0^2 - \mathbf{K} \cdot \mathbf{K}}) > 0 \\ -\sqrt{k_0^2 - \mathbf{K} \cdot \mathbf{K}}: \sigma m(\sqrt{k_0^2 - \mathbf{K} \cdot \mathbf{K}}) < 0 \end{cases} \quad (6)$$

$\mathbf{k}^+ = \mathbf{K} + \gamma(\mathbf{K}, \omega) \hat{z}$: 평면파 $e^{i\mathbf{k}(\omega) \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}')}$ 에 해당하는 파 벡터

식 (6)은 균질 평면파 ($|\mathbf{K}| \leq k_0$)와 소멸파 ($|\mathbf{K}| > k_0$)를 포함한다. 대부분의 회절지오토모그래피에서는 산란장의 측정이 파장에 비해 상당히 먼 위치에서 이루어지므로 소멸파 성분에 의한 산란 효과를 무시할 수 있으나 지표레이다 탐사에서는 탐사 대상이 되는 산란체와 측정점의 거리에 비해 파장이 크므로 소멸파에 의한 영향을 고려하여야 한다. 식 (5)을 식 (4)에 대입하고 지표($z=0$)에서 측정된 산란장으로 나타낸

후 공간 주파수 영역으로 변환하면 다음 식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{E}}_{sca}(\mathbf{K}, \omega) &= \frac{1}{2\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} d^2 \mathbf{X} e^{-i\mathbf{K} \cdot \mathbf{X}} \left[\mathbf{E}_{sca}(\mathbf{X}, \omega) \right]_{z=0} \\ &= \frac{-i k_0^2(\omega)}{8\pi^2 \gamma(\mathbf{K}, \omega)} \int_{z' < 0} e^{-i\mathbf{k}^+(\omega) \cdot \mathbf{r}'} \left[\bar{\mathbf{I}} + \frac{\mathbf{k}^+(\omega) \mathbf{k}^+(\omega)}{k_0^2} \right] \\ &\quad \cdot \mathbf{E}_{inc}(\mathbf{r}', \omega) \mathbf{O}(\mathbf{r}', \omega) \end{aligned} \quad (7)$$

Deming(1997)에 의하면 수신기가 \mathbf{X}_j 에 있을때 가해진 전압이 $C(\omega)$ 이고 안테나 임피던스가 $\mathbf{Y}_0(\omega)$ 일 때 측정된 전압은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} V(\omega; \mathbf{X}_j) &= P(\omega) \int_{-\infty}^{\infty} d^2 \mathbf{K} \int_{-\infty}^{\infty} d^2 \mathbf{K}_0 e^{-i(\mathbf{K}_0 - \mathbf{K}) \cdot \mathbf{X}_j} \mathbf{B}(\mathbf{K}, \mathbf{K}_0; \omega) \\ &\quad \times \int_{-\infty}^0 dz' e^{-i[\gamma(\mathbf{K}, \omega) + \gamma(\mathbf{K}_0, \omega)]z'} \int_{-\infty}^{\infty} d^2 \mathbf{X}' e^{-i(\mathbf{K} - \mathbf{K}_0) \cdot \mathbf{X}'} \mathbf{O}(\mathbf{r}') \end{aligned} \quad (8)$$

여기서

$$\begin{aligned} \mathbf{B}(\mathbf{K}, \mathbf{K}_0; \omega) &\equiv \mathbf{S}_{10}(-\mathbf{K}; \omega) \cdot \left[\bar{\mathbf{I}} + \frac{\mathbf{k}^+(\omega) \mathbf{k}^+(\omega)}{k_0^2(\omega)} \right] \\ \mathbf{S}_{10}(\mathbf{K}_0; \omega) P(\omega) &= \frac{-iC(\omega) k_0^2(\omega)}{8\pi^2 \omega \mathbf{Y}_0(\omega) \mu_0} \end{aligned}$$

이다. 만약 각 측정마다 송수신원 간격이 \mathbf{X}_0 로 일정하다면 $\mathbf{B}(\mathbf{K}, \mathbf{K}_0; \omega)$ 에 $e^{i\mathbf{K} \cdot \mathbf{X}_0}$ 를 곱해 주어야 한다.

수평 방향으로 측정 간격이 Nyquist 조건을 만족할만큼 작다면 각 측정들을 연속한 변수로 간주할 수 있으며 식 (8)을 공간 방향으로 푸리에 변환하면 식 (9)가 되고 공간 주파수 영역으로 변환하면

$$\begin{aligned} \tilde{V}(\omega_h; \mathbf{K}) &= \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} d^2 \mathbf{X} e^{-i\mathbf{K} \cdot \mathbf{X}} V(\omega_h; \mathbf{X}) \\ &= P(\omega_h) \int_{-\infty}^{\infty} d^2 \mathbf{K}_0 \mathbf{B}(\mathbf{K} + \mathbf{K}_0, \mathbf{K}_0; \omega_h) \\ &\quad \times \int_{-\infty}^0 dz' e^{-i[\gamma(\mathbf{K}, \omega_h) + \gamma(\mathbf{K}_0, \omega_h)]z'} \int_{-\infty}^{\infty} d^2 \mathbf{X}' e^{-i\mathbf{K} \cdot \mathbf{X}'} \mathbf{O}(\mathbf{r}') \end{aligned} \quad (9)$$

이 되어 (9)식은 (10)식과 같은 연산관계로 정의할 수 있다. (10)식에서 $\mathbf{r}' = (\mathbf{X}', z')$ 이다

$$\tilde{V}(\omega_h; \mathbf{K}) = \mathbf{H} \mathbf{O}(\omega_h; \mathbf{r}) \quad (10)$$

여기서 구하고자 하는 것은 (10)식을 만족시키는 목적함수 $\mathbf{O}(\mathbf{r})$ 이다. 그런데 측정 주파수의 개수는 제한되어 있으므로 (10)식은 under-determined 문제가 되고 Tikhonov-Philips 평활화 가역산 연산자를 이용하면 최소 L^2 -norm 해를 구할 수 있다.

$$\mathbf{O}_\beta(\mathbf{r}) = \mathbf{H}^\dagger (\mathbf{H} \mathbf{H}^\dagger + \beta \mathbf{I})^{-1} \tilde{V}(\omega_h, \mathbf{K}) \quad (11)$$

\mathbf{H}^\dagger 는 \mathbf{H} 의 Hermitian adjoint이며 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \mathbf{H}^\dagger \tilde{V}(\mathbf{r}') &= \hat{\mathbf{O}}_\beta(\mathbf{r}') \\ &= \sum_{n=1}^N P^*(\omega_n) \int_{-\infty}^{\infty} d^2 \mathbf{K}' \int_{-\infty}^{\infty} d^2 \mathbf{K}_0' \mathbf{B}(\mathbf{K}' + \mathbf{K}_0', \mathbf{K}_0'; \omega_n) \\ &\quad \times e^{-i[\gamma^*(\mathbf{K}' + \mathbf{K}_0', \omega_n) + \gamma^*(\mathbf{K}_0', \omega_n)]z'} \int_{-\infty}^{\infty} d^2 \mathbf{X}' e^{-i\mathbf{K}' \cdot \mathbf{X}'} \hat{\mathbf{V}}(\omega_n, \mathbf{K}) \end{aligned} \quad (12)$$

여기서 $\hat{V} = (HH^T + \beta I)^{-1} \tilde{V}$ 이다

β 는 Tikhonov-Philips 평활화계수(regularization factor)이고 수치 오차와 측정 잡음으로부터 역산을 안정화시키는 역할을 한다. 그리고 $(HH^T + \beta I)^{-1}$ 는 일반적인 회절지오토모그래피에서 사용되는 필터 역전파 알고리즘(Devaney, 1984)에서 필터링 역할을 하며 H는 역전파로 볼 수 있다.

결과 및 고찰

본 연구에서는 식 (12)의 연산자를 2차원 전자기파 모형반응계산 자료에 적용하여 실제 자료에 대한 활용성을 살펴 보았다. 이를 위해 기존의 알고리즘에 비해 현장자료와의 부합성이 뛰어난 것으로 알려진 이영균(1997)의 유한차분 알고리즘을 이용하였다. 본 연구에서 사용된 회절지오토모그래피 알고리즘은 다중주파수와 소멸파를 고려하여 고 분해능의 영상을 구할 수 있다. 그러나 소멸파를 고려하므로써 역산의 안정성이 떨어진다는 문제점이 있다. 이런 역산의 불안정성은 해석적인 방법으로 구한 평활화 연산자를 통해 해결한다. 알고리즘의 적용조건을 추정하기 위해 평활화 계수, 영상화 주파수 대역, 영상화 주파수의 개수 등의 역산 매개변수들에 대해 고찰하였다. 이를 위해 약산란 가정을 만족하는 간단한 모형에 본 알고리즘을 적용하여 적절한 매개변수에 대해 고찰해 보았고 이를 통해 보다 일반적인 모형에 대해 적용하였다.

역산매개변수 추정

역산 매개변수 추정을 위해 회절지오토모그래피의 기본 가정인 약산란을 만족시키는 고립형 대상체 모형을 구성한 후 여러 변수를 변화시켜가며 이를 영상화하여 그 영향을 고찰해 보았다. 대략적으로 지표레이다 탐사에서 약산란체는 유전율 물성비(ϵ/ϵ_0)가 0.8과 1.2 사이인 경우라고 알려져 있다. 따라서 이러한 조건을 만족하는 고립 대상체에 의한 산란장에 대해 역산 매개변수를 추정하였다. 모형의 배경매질은 상

대유전율이 2.5인 균질한 매질이며 고립 대상체의 크기는 가로 1 m, 세로 0.1 m이고 그 상대유전율은 3.0으로 하였다. 송신원의 주파수는 200 MHz로 하였다. 측정 간격은 0.5 m이며 측정 횟수는 64회이다. Fig. 1-(a)는 매개변수 추정에 적용된 모형이며 Fig. 1-(b)는 모형에 대한 레이더그램이다.

식 (14)로 표현되는 역산 알고리즘은 다중주파수의 합으로 나타남으로 영상화 주파수 대역에 따라 그 분해능이 달라진다. 따라서 적절한 주파수 영역의 선택은 매우 중요한 요소이다. 이에 대한 고찰을 위해 고주파수에서 저주파수까지 포함해서 적용한 결과, 저주파수에서 주파수까지 적용한 결과 그리고 주파수에서 고주파수까지 포함한 결과를 함께 비교해 보았다. 이 때 사용된 주파수는 각각 40개이며 평활화 계수는 1.0×10^{-6} 이다. Fig. 2는 위의 3가지 조건으로 구한 목적함수를 나타낸 것이며 Fig. 3는 이의 수직 수평단면도를 그려 이를 비교한 것이다. Fig. 2-(a)는 57~200 MHz의 주파를 사용하여 영상화한 결과로 수평적으로 부드러운 양상의 영상을 보이나 수직방향으로 반복적인 형태가 비교적 큰 주기로 나타나며, Fig. 3를 보면 구해진 목적함수 값은 실제보다 크게 나타난다. Fig. 2-(b)는 200~500 MHz의 주파수를 사용하여 영상화한 결과로 수직방향으로 반복적인 형태가 짧은 주기로 나타남을 볼 수 있으며 Fig. 3을 보면 구해진 목적함수 값은 실제의 절반 정도이다. Fig. 2-(c)는 57~500 MHz의 주파수를 사용한 결과로 구해진 영상이 실제 고립대상체의 형태와 위치를 정확히 재구성하며 Fig. 3에서 볼 수 있듯이 구해진 목적함수 값 또한 실제 값에 근접함을 볼 수 있다. 이는 저주파수의 해의 안정성과 고주파수의 분해능을 고려할 수 있기 때문으로 사료된다.

평활화 계수가 역산에 미치는 영향을 살펴보기 위해 평활화 계수를 변화시키면서 적용해 보았다. 평활화 연산(regularization)은 식 (11)에서 볼 수 있듯이 지하에 전파되는 안테나의 에너지와 관련이 있다. 따라서 평활화 연산시 사용되는 평활화 계수는 안테나 에너지에 영향을 받는 값을 알 수 있다. 이는 탐사시 사용 안테나에 따라 그 값을 달리 추정

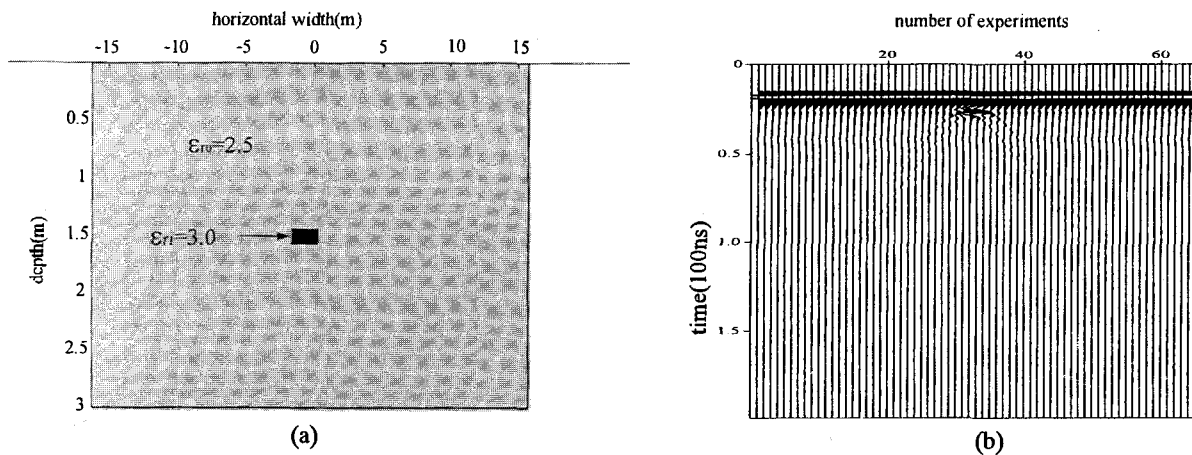


Fig. 1. Small weak scatterer and its radargram. (a) model and (b) radargram

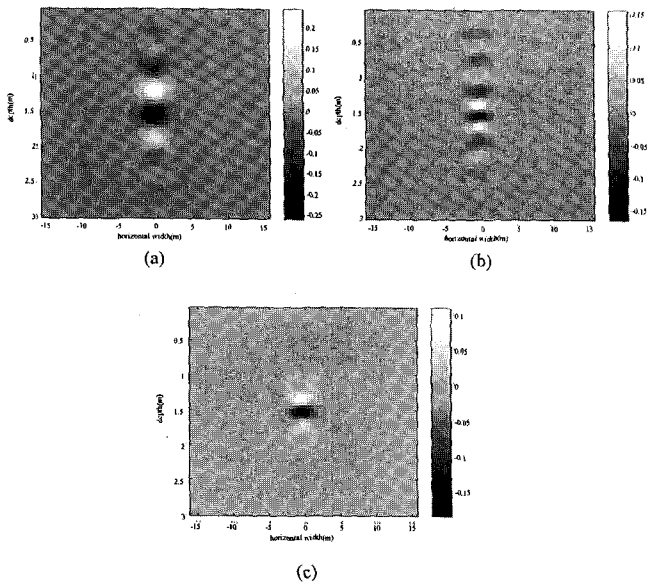


Fig. 2. Reconstructed object function for various frequency range. (a) 57~200 MHz, (b) 200~500 MHz and (c) 57~500 MHz

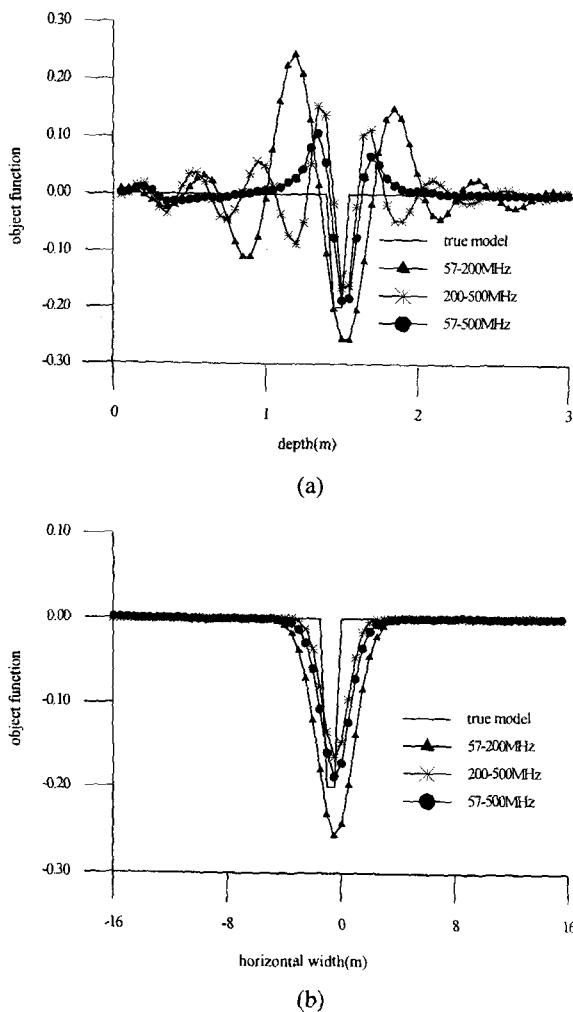


Fig. 3. Vertical and horizontal slices of object function for various frequency band. (a) vertical slices and (b) horizontal slices

해야 한다는 것을 의미한다.

앞서와 동일한 조건에서 고주파수 잡음의 영향을 억제시켜 해를 안정화시키면서 적절한 분해능을 줄 수 있는 평활화 계수를 추정하였으며 40개의 주파수를 사용하여 평활화 계수 값을 8.0×10^{-7} , 1.0×10^{-6} , 1.5×10^{-6} 으로 하여 적용하여 보았다. Fig. 4는 각 평활화 계수에 따라 재구성된 목적함수들이며 Fig. 5는 이의 수직, 수평단면도를 그려 이를 실제값과 비교한 것이다. 재구성된 영상들은 실제 모형에 가까운 분해능을 보이거나 그 물체치는 Fig. 5에서 볼 수 있듯이 달라진다. Fig. 4-(a)는 8.0×10^{-7} 에서의 결과로 실제값보다 조금 큰 값을 보여주며 Fig. 4-(b)는 1.0×10^{-6} 일 때 가장 근접하며 Fig. 4-(c)는 1.5×10^{-6} 에서의 결과로 실제값의 반 정도의 값을 가짐을 알 수 있다.

영상 주파수 개수에 따른 영상 분해능의 변화를 고찰하기 위해 57~500 MHz 주파수 대역에서 샘플링 주파수의 개수를 10개에서 60개까지 10개 단위로 선형적으로 증가시켜가며 알고리즘을 적용해 보았다. Fig. 6은 재구성된 목적함수들이다. Fig. 7은 사용주파수별 목적함수의 수직 단면도, 수평 단면도를 그려 원래의 함수 값과 비교하였다. 10개와 20개의 주파수를 사용하였을 때 재구성된 목적함수의 상부에 나타나는 영상은 고주파에서 소멸파를 고려함으로써 발생한 잡음의 영향에 의한 것이며 사용주파수가 많아질수록 잡음의 영향이 감소하여 영상이 선명해지는 것을 볼 수 있다.

약산란 가정에서 벗어나는 모형에 대한 적용

약산란 가정에서 벗어나는 모형들에 대하여 위에서 구한 매개변수들을 이용하여 알고리즘의 적용성을 확인하고자 하였다. 배경매질과 송신원의 주주파수는 앞과 동일하다.

심도방향으로 고립형 대상체의 위치가 바뀌고 그 크기가

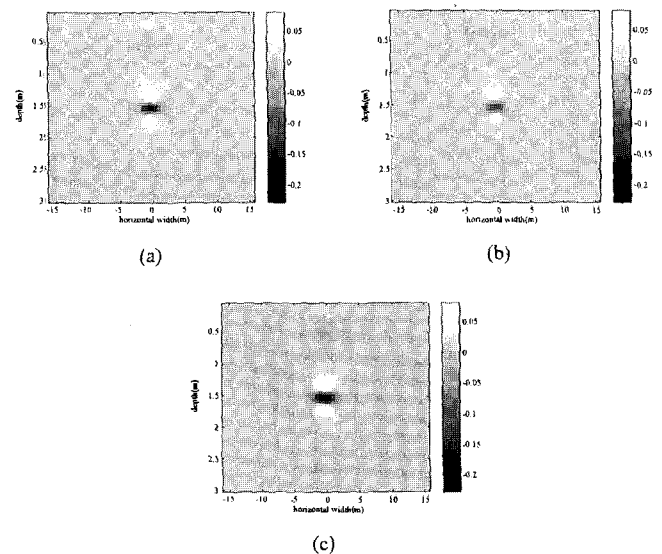


Fig. 4. Reconstructed object function for various regularization factor. (a) 8×10^{-7} , (b) 10^{-6} and (c) 1.5×10^{-6}

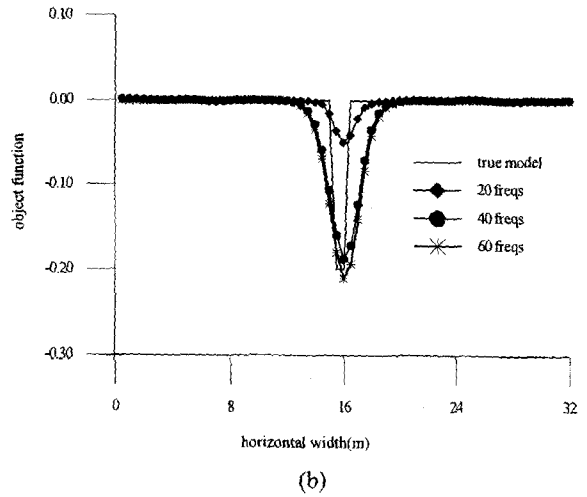
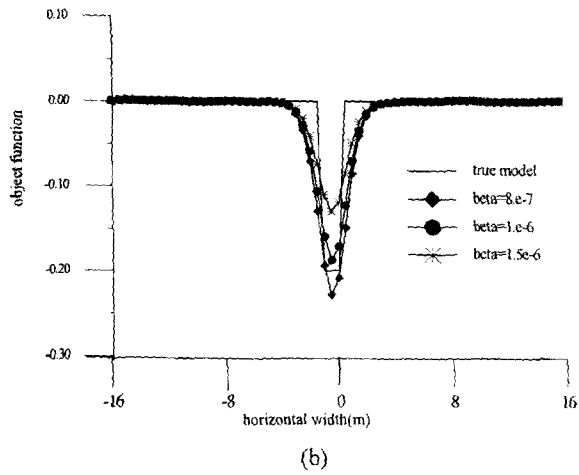
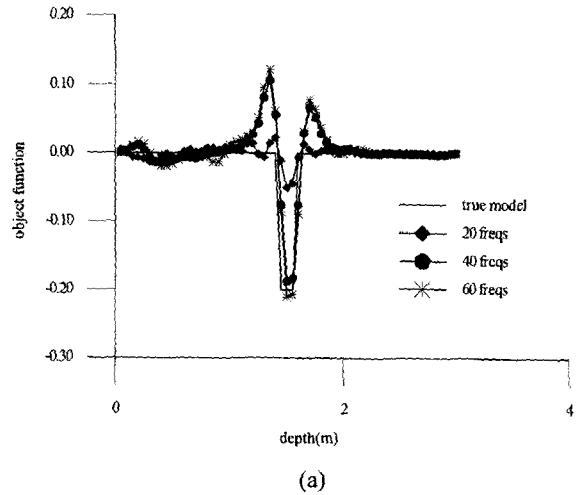
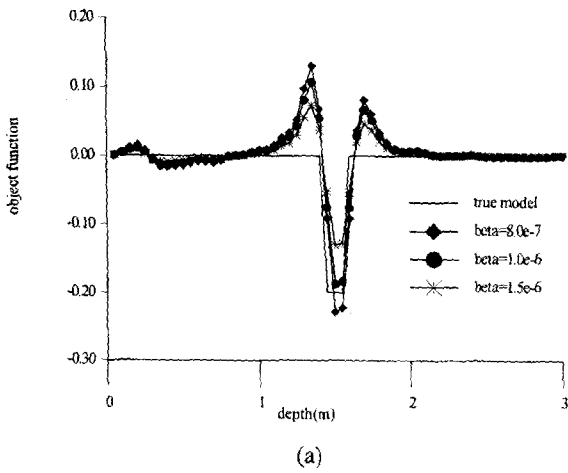


Fig. 5. Vertical and horizontal slices of object function for various regularization factor. (a) vertical slices and (b) horizontal slices

Fig. 7. Vertical and horizontal slices of object function for various number of frequencies. (a) vertical slices and (b) horizontal slices

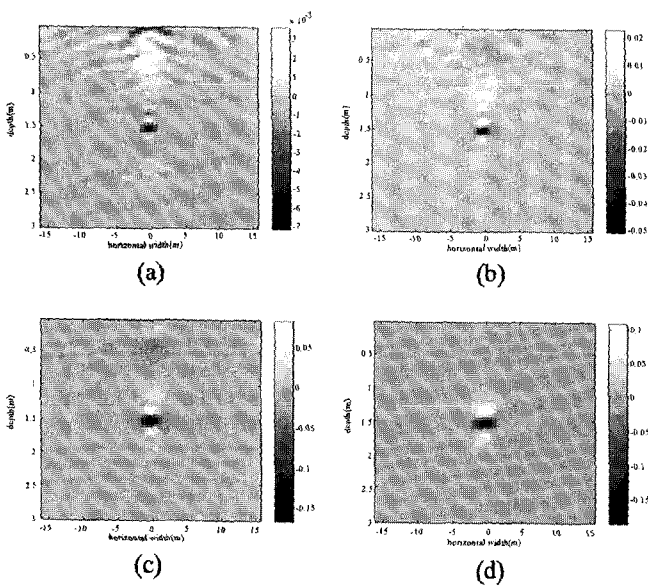


Fig. 6. Reconstructed object function for various number of frequencies. (a) 10 frequencies, (b) 20 frequencies, (c) 30 frequencies and (d) 40 frequencies

커졌을 때 그 영향과 결과를 살펴보기 위해 Fig. 8과 같은 고립 대상체에 적용해 보았다. Fig. 8에서 볼 수 있듯이 유전율 물성비(1.4)는 알려진 약산란체 가정($0.8 \leq \epsilon/\epsilon_0 \leq 1.2$)을 20% 벗어난다. Fig. 9에 재구성된 영상과 함께 재구성된 목적함수의 수직수평 단면도와 원래의 목적함수를 비교하여 도시하였다. 물성대비치가 실제 값에 근접함을 확인할 수 있으며 구해진 영상단면도 모형과 거의 일치함을 알 수 있다 유전율 물성비가 약산란가정을 조금 벗어나는 큰 고립 대상체에도 적용 가능함을 알 수 있다.

실제 지표레이다 탐사에서는 산란체가 여러 개 있는 경우가 많으므로 Fig. 10-(a)와 같이 산란체가 3개 있어 회절 현상이 겹쳐 일어나는 모형에 대해 다중 주파수 필터 역전파 알고리즘을 적용하여 보았다. 배경 매질은 앞서와 동일하며 산란체는 공동으로 상대유전율을 값은 1.0이다. Fig. 10-(b)는 적용 결과로 비교적 실제모형에 근접한 결과를 보인다. 그러나 복원된 목적함수의 값을 원래 값과 비교해 보면 8배 정도로 매우 큰 차이가 나며 굴절률 차이가 큰 복잡한 모형에서는 정확한 물성치는 복원하지 못함을 알 수 있다.

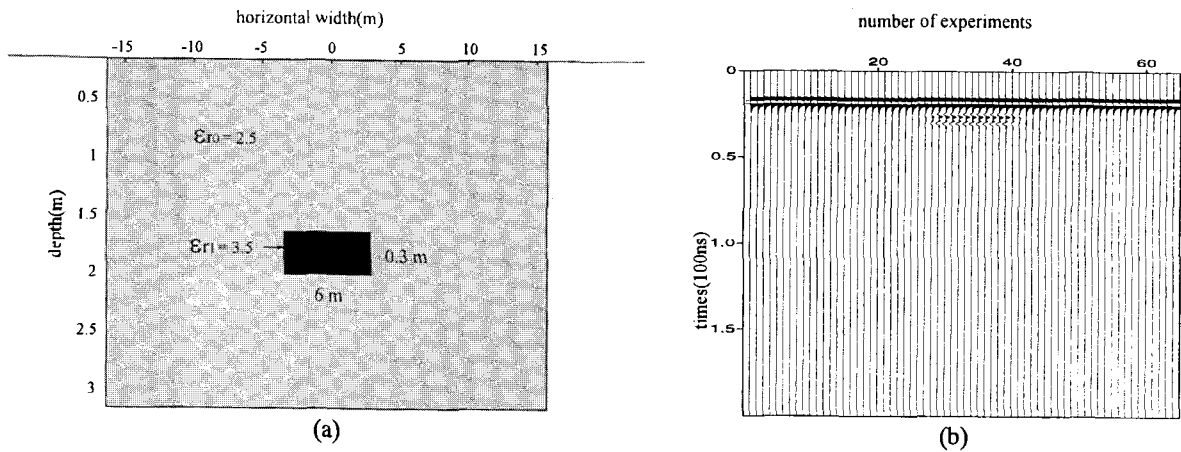


Fig. 8. Wide rectangular model and its radargram. (a) model and (b) radargram

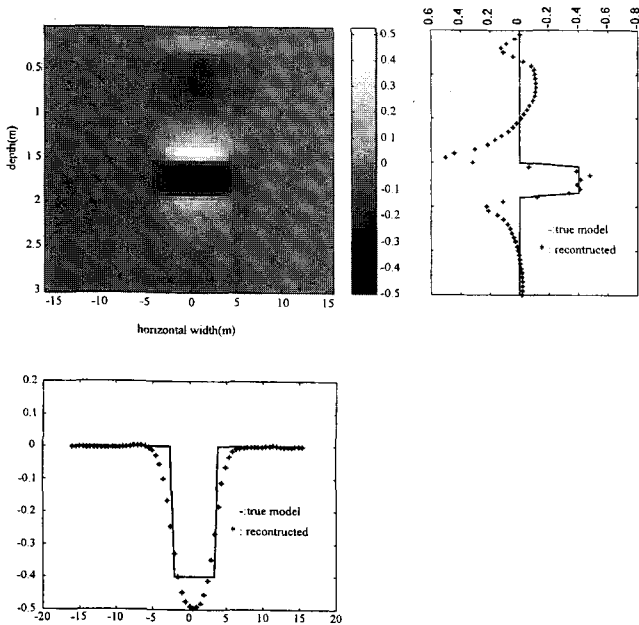


Fig. 9. Reconstructed object function for wide rectangular model.

결론

본 연구에서는 지표레이다 자료 처리에 적합하게 변형된 회절지오토모그래피 알고리즘을 표준적인 약산란 모형자료에 적용하여, 그 역산 매개변수인 평활화 계수, 사용 주파수 영역, 사용 주파수의 수 등을 추정하였으며, 여기서 얻은 정보를 이용하여 같은 조건(동일한 배경 매질, 동일한 주파수를 가지는 송신원)을 가진 모형들에 적용하여 그 적용조건과 적용한계를 알아보려고 하였다. 이로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 우선 본 알고리즘을 실제자료에 적용하기 위해서는 적절한 매개변수값의 추정이 필수적이다. 영상화 주파수 대역은 신호가 가지는 전대역의 자료를 이용하므로써 좋은 분해능을 얻을 수 있었다. 영상화 주파수 샘플링 개수는 많을수록 좋으나 물성대비 경계면을 확인할 수 있을 정도면 충분할 것으로 판단된다. 평활화 계수는 송신원의 주파수와 배경 매질에 따라 달라지므로 그 매질과 송신원의 주파수 대역을 고려

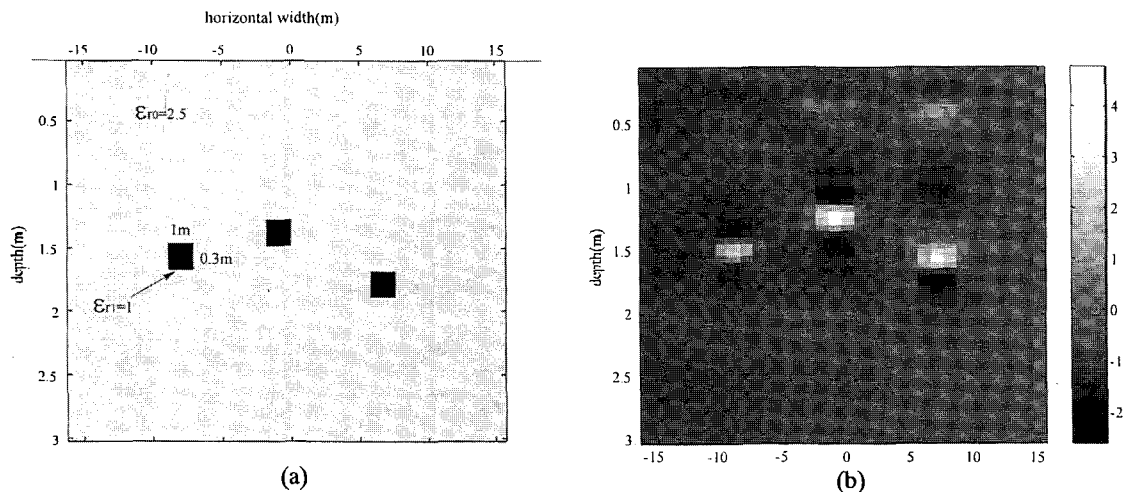


Fig. 10. 3-scatterer model and reconstructed object function. (a) model and (b) reconstructed object function

하여 추정해 주어야 한다.

2. 약산란 가정($0.8 \leq \epsilon/\epsilon_0 \leq 1.2$)에 20% 정도 벗어나는 유전율 물성비를 가지는 판상 고립 대상체에 적용한 결과 고 분해능의 영상을 구할 수 있었으며, 이로부터 유전율 물성비가 약산란 가정을 조금 벗어나는 큰 고립대상체에도 알고리즘의 적용성을 확인할 수 있었다.

3. 공동 3개가 서로 근접해 있어 회절 현상이 겹쳐 일어나는 모형에 적용해 본 결과 물성치의 왜곡은 있지만 고 분해능의 영상을 얻을 수 있었다. 이로부터 회절 현상이 겹쳐서 나타나는 모형에서도 고 분해능의 영상을 구할 수 있는 알고리즘을 확인하였다.

사 사

본 연구는 한국과학재단 특정기초 연구비로 수행된 "정밀 지반조사를 위한 지하구조 영상화 기법 연구"의 일부로 수행되었음을 밝힙니다.

참고문헌

1. 김학수, 1994, 변형된 Born 근사를 이용한 회절지오토모그래피에 관한 연구: 공학박사학위논문, 서울대학교.
2. 송영수, 1990, 회절지오토모그래피를 이용한 영상 재구성에 관한 연구: 공학박사학위논문, 서울대학교.
3. 이영균, 1997, 주파수 의존성을 고려한 지표레이다 모형반응 계산: 공학석사학위논문, 서울대학교.
4. 이진용, 1996, 가청주파수영역의 시추공간 전자탐사자료의 영상화: 공학석사학위논문, 서울대학교.
5. Chew, W. C., 1990, Waves and fields in inhomogeneous media. New York: Van Nostrand.
6. Deming, R. W. and Devaney, A. J., 1997, Diffraction tomography for multi-monostatic ground penetrating radar imaging: Inverse Problems, **13**, 29-45.
7. Devaney, A. J., 1984, Geophysical diffraction tomography: IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, **22**, 3-13.
8. Molyneux, J. E. and Witten, A., 1993, Diffraction tomographic Imaging for multi-monostatic measurement geometry IEEE Trans. Geosci. remote sensing, **31**, 507-511.
9. Molyneux, J. E., 1995, Ground penetrating radar tomography: Proc. SPIE, **76**, 2813-2816.
10. Kerns, D. M., 1975 Scattering matrix description and near field measurements of electroacoustic traducers: J. Acoust. Soc. Amer., **57**, 497-507.
11. Schatzberg, A. and Devaney, A., 1995, Maximum likelihood estimation of target location in acoustic and electromagnetic imaging: SEG Expanded Abstracts, 829-832.
12. Witten, A. J., Molyneux, J. E., Nyquist, J. E., 1994, Ground penetrating radar tomography: IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sensing, **32**, 146-167.
13. Wu, Ru-Shan and Fernando, V. A., 1991, Multifrequency backscattering tomography; principles and reconstruction methods: SEG Expanded Abstracts, 967-969.