

## 광대역 전자파를 이용한 역산란 해석 연구

### Analysis of Microwave Inverse Scattering Using the Broadband Electromagnetic waves

°이정훈 · 정용식

°Jung-Hoon Lee, Young-Seek Chung

명지대학교 통신공학과 RF 및 Antenna 연구실 - 석사과정\*

명지대학교 통신공학과 조교수

Master course, RF&Antenna Laboratory, Depart of Communication Eng. Myong-Ji University\*

Professor, RF&Antenna Laboratory, Depart of Communication Eng. Myong-Ji University

#### 요 약

본 논문에서는 시간영역 유한차분법(FDTD: Finite-Difference Time-Domain Method)과 설계민감도법(Design Sensitivity Analysis)을 이용하여 유전체 산란체(Dielectric Scatterer)를 복원하기 위한 역산란문제(Inverse Scattering)의 새로운 해석기법을 제안하였다. 이때 복원의 빠른 수렴을 위하여 도함수를 이용한 설계민감도법을 도입하였고 본 연구에서는 시간영역 유한차분법으로부터 직접 설계민감도 수식을 도출하였다. 계산의 효율성을 위하여 보조변수법(Adjoint Variable Method)을 도입하여 보조변수 방정식을 도출하고 최적화 알고리즘으로 최대경사도법을 이용하여 반복적인 추정을 통하여 유전체를 복원하였다. 본 연구의 타당성의 보이기 위하여 2차원  $TM^z$ 에서의 유전체 복원 사례를 제시한다.

주요어 : 역산란 문제, 시간영역 유한차분법, 설계민감도, 최적화

#### Abstract

In this paper, we proposed a new algorithm of the inverse scattering for the reconstruction of unknown dielectric scatterers using the finite-difference time-domain method and the design sensitivity analysis. We introduced the design sensitivity analysis based on the gradient for the fast convergence of the reconstruction. By introducing the adjoint variable method for the efficient calculation, we derived the adjoint variable equation. As an optimal algorithm, we used the steepest descent method and reconstructed the dielectric targets using the iterative estimation. To verify our algorithm, we will show the numerical examples for the two-dimensional  $TM^z$  cases.

Key words : inverse scattering, FDTD, Design sensitivity, optimization

### 1. 서 론

마이크로파를 이용한 역산란문제(Inverse Scattering Problem)는 미지의 산란체에 의한 전자파의 반사파 성분을 측정하여 산란체의 매질 특성과 형상을 복원하는 것으로 지질탐사와 비파괴 검사 등의 분야로부터 최근 들어 인체내부의 암조직(Cancer Tumor) 등을 찾는 생명공학의 분야에 까지 광범위하게 적용되고 있다[1].

역산란문제의 해석법은 크게 주파수영역 해석법과 시간영역 해석법으로 나눌 수 있다. 특히 시간영역의 해석법은 광대역의 신호를 이용 할 수 있기 때문에 산란체 복원의 정확성이 높다. 이러한 마이크로파 역산란문제의 시간 영역해

석법으로 시간영역 유한차분법과 시간영역 유한요소법(FETD: Finite Element Time Domain Method) 등이 사용되고[2]-[3], 이중 시간영역 유한차분법이 해석의 간편성과 빠른 속도 등의 이유로 많이 적용되고 있다.

역산란문제를 위한 해석의 평가를 위하여 목적함수(Objective Function) 혹은 비용함수(Cost Function)를 정의하게 된다. 이때 목적함수는 미지의 산란체에 의한 반사파와 추정된 산란체에 의한 반사파의 차이에 의한 에너지 등으로 정의될 수 있다. 이때 추정된 산란체가 원 산란체에 가까워지면 이러한 목적함수의 값은 감소를 하게 되고 두 산란

체의 모양이 일치하면 이론적으로 목적함수의 값이 '0'이 된다. 그러므로 역산란문제의 해석법은 산란체의 추정을 통한 목적함수의 최소화과정이라고 볼 수 있다. 이때 산란체의 추정을 위하여 이산화된 복원영역의 각 요소에서 정의되는 매질특성을 변수로 설정할 수 있다. 이때 매질변수와 목적함수는 비선형 음함수(Nonlinear Implicit Function)의 형태로 표현되므로 목적함수의 최소값을 찾기 위해서는 반복계산 알고리즘이 필요하다. 또한 매질변수에 의한 목적함수의 최소화과정은 기존의 최적화 이론과 동일한 것으로 비결정론적 알고리즘(Undeterministic Algorithm)과 결정론적 알고리즘(Deterministic Algorithm)이 있다. 비결정론적 알고리즘은 유전알고리즘 등과 같은 목적함수의 값만을 이용하여 최적의 해를 찾는 것으로 목적함수의 미분정보를 요구하지 않는다. 결정론적 알고리즘은 최대경사도법(Steepest Descent Method) 등과 같이 목적함수의 미분정보를 이용하여 극점을 찾는 방법으로 목적함수가 2차함수(Quadratic Function)의 형태를 갖는다면 매우 빠른 수렴 속도로 최적해를 찾을 수 있다. 본 연구에서는 목적함수의 미분정보를 구하기 위하여 설계민감도법(DSA: Design Sensitivity Analysis)을 적용하였다. 설계민감도법은 기계항공분야에서 유한요소법을 이용한 최적설계를 위한 기법으로 최근 들어 역산란문제의 해석법으로 활발히 적용되고 있다. 특히 시간영역 유한차분법을 이용한 설계민감도 법은 행렬식을 갖지 않는 시간영역 유한차분법의 특성으로 직접 유도하기가 매우 까다롭다. 본 연구에서는 공간적으로 이산화된 시간영역 맥스웰방정식을 이용하여 직접 설계민감도 수식을 이론적으로 도출하였다. 또 설계민감도의 효율적 계산을 위하여 보조변수법(Adjoint Variable Method)[4]-[5]을 도입하였고 이러한 보조변수 수식도 기존 전자파 방정식과 동일하게 시간영역 유한차분법으로 해석할 수 있음을 보였다.

본 연구의 타당성을 입증하기 위하여 2차원  $TM^z$  유전체 형상의 복원사례를 제시하였다. 이때 최소화과정을 위한 알고리즘으로 최대경사도법(Steepest Descent)을 이용하였다.

## II. FDTD-DSA를 이용한 역산란 문제해석

마이크로파 역산란 해석문제에서는 일반적으로 해석영역 내부에 광대역 펄스의 평면파를 입사하고, 산란체에 의해 발생된 반사파를 산란체 주변의 위치에서 측정한다. 이때 평면파를 입사하기 위하여 Total Field / Scattered Field의 알고

리즘을 사용하였고 반사파의 측정은 반사파의 영역에서 실시하였다. 또한 유한한 해석공간을 위하여 완전흡수체(PML: Perfectly Matched Layer)를 최외곽에 배치하여 반사파를 흡수하도록 하였다[6].

### 2-1. 문제정의

유전체에 의한 역산란문제 해석 시 목적함수(F)는 매질변수 혹은 역산란문제 변수(p)의 함수로 표현되며[5], p는 유전율의 정보를 갖는 벡터로 표시된다. 이때 목적함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

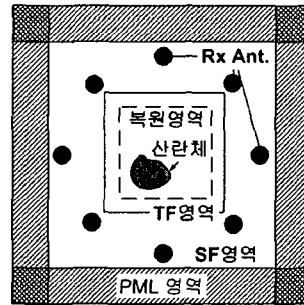


그림 1.  $TM^z$  평면파가 각방향에서 입사하는 PML 수치적 구조  
Fig. 1. Numerical configuration of problem. The  $TM^z$  plane wave is incident at each direction

$$F = \int_0^{T_f} G(E(p), H(p)) dt \quad (1)$$

여기서,

$$G(E, H) = \sum_{i=1}^{N_T} \sum_{j=1}^{N_R} |E_c^s(p) - \widetilde{E}_m^s|^2 + |H_c^s(p) - \widetilde{H}_m^s|^2 \quad (2)$$

로 나타나고,  $\widetilde{E}_m^s$ 는 원 산란체에 의한 반사전계의 세기이고,  $E_c^s(p)$  추정된 산란체에 의한 반사 전계의 세기를 나타낸다.  $T_f$ 는 총 해석시간으로 반사파의 신호가 충분히 진행된 시간을 의미한다. 식 (2)의 목적함수 F에서 역산란문제 변수 p를 포함하고 있는 부분은  $E_c^s(p)$ 항이다.  $N_T, N_R$ 은 각각 송신 안테나의 개수와 수신안테나의 개수이다. 식 (1)을 p에 관해 전미분(Total Derivative)을 취하면, 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{dF}{dp} &= \int_0^{T_f} \frac{\partial G}{\partial p} dt = \int_0^{T_f} \left( \frac{\partial E}{\partial p} + \frac{\partial H}{\partial p} \right) dt \\ &= \int_0^{T_f} (G_E \ G_H) \cdot (E_p \ H_p)' dt \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,  $G_E, G_H, E_p, H_p$ 는 다음과 같이 정의되는 미분함수이다.

$$G_E = \frac{\partial G}{\partial E}, G_H = \frac{\partial G}{\partial H}, E_p = \frac{\partial E}{\partial p}, H_p = \frac{\partial H}{\partial p} \quad (4)$$

식 (1)에서  $(E, H)$ 의 역산란문제 변수  $p$ 를 포함하는 항은  $E_c$ 이므로, 식 (3)의 우변에서 다른 항들은 0으로 되고,  $G_E$ 는 알려진 값이므로, 식 (3)은 결국  $E_p$ 와  $H_p$ 를 구하는 문제로 변경된다.

### 2-2. 설계민감도 (Design Sensitivity)

맥스웰 회전방정식을 직각 좌표계에서  $TM^z$  모드로 표현하면 다음과 같다.

$$\mu \frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{\partial E_z}{\partial x} \quad (5)$$

$$\mu \frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{\partial E_z}{\partial y} \quad (6)$$

$$\epsilon \frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - J_z \quad (7)$$

여기서  $E, H$ 는 각각 전·자계를 나타내고  $J_z$ 는 외부에서 인가된 전원의 전류밀도이다.  $\epsilon, \mu, \sigma$ 는 각각 유전율, 투자율, 전도율을 나타낸다. 식 (5)-(7)을 중앙차분법을 이용해 공간상의 이산화 과정을 적용한 시간영역 방정식으로 다시 표현하면 다음과 같다.

$$[\epsilon] \{E\} = [L_1] \{H\} + \{J\} + [\sigma] \{E\} \quad (8)$$

$$[\mu] \{H\} = [L_2] \{E\} + [\sigma^*] \{H\} \quad (9)$$

여기서,  $[\sigma] \{E\}$ 와  $[\sigma^*] \{H\}$ 는 그림 1에 나타난 PML(Perfect Matched Layer)에 의한 흡수경계조건을 만족하기 위해 존재하는 항으로서 각각 전계와 자계에 의한 손실을 의미한다. 식 (8)과 (9)를 함께 표현하면 다음과 같은 행렬식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \epsilon & 0 \\ 0 & \mu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E \\ H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma & L_2 \\ L_1 & \sigma^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E \\ H \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} J \\ M \end{bmatrix} \quad (10)$$

위의 전자계변수상의  $\dot{\cdot}$ 는 시간에 대한 미분연산자이고,  $[L_1]$ 과  $[L_2]$ 는 공간에 대한 미분연산자를 중앙차분법을 적용하여 변환된 계수벡터이다. 식 (3)의 계산을 위한  $E_p$ 와  $H_p$ 를 구하기 위하여 식 (10)을 역산란문제 변수  $p$ 에 관해 미분을 취하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \epsilon_p & 0 \\ 0 & \mu_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_p \\ H_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon & 0 \\ 0 & \mu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_p \\ H_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_p & L_{2,p} \\ L_{1,p} & \sigma_p^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_p \\ H_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} J_p \\ M_p \end{bmatrix} \quad (11)$$

여기서 자계의 전류원은 존재하지 않고 투자율은 상수라고 가정한다. 그리고  $\mu_p, \sigma_p, \sigma_p^*$ 와  $J_p, M_p$ 은 역산란문제 변수

수에 독립인 항들이며,  $L_{1,p}, L_{2,p}$ 은 공간에 대한 미분연산자이므로 이 항들은 역산란문제 변수  $p$ 에 관해 전미분하면 모두 '0'이 된다. 따라서, 식 (11)을 식 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \epsilon & 0 \\ 0 & \mu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_p \\ H_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma & L_2 \\ L_1 & \sigma^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_p \\ H_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Q \\ 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

여기서  $Q = -\epsilon_p E$ 이다. 위의 식을 계산하면  $E_p$ 와  $H_p$ 를 얻을 수 있고 이 값을 식 (3)에 대입하면 목적함수의 미분정보를 계산할 수 있다. 하지만 식 (12)의 계산은 역산란 문제 변수벡터  $p$ 의 성분 수만큼 계산해야 하는 단점이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 보조변수를 도입하면  $p$ 의 성분 수와 관계없이 한 번의 계산으로 설계민감도를 계산할 수 있다. 보조변수 벡터  $(\lambda, \gamma)$ 를 식 (12)의 양변에 곱하고 시간 영역에 대한 적분을 취하면 다음과 같다.

$$\int_0^{T_f} (\lambda, \gamma)^T \left\{ \begin{bmatrix} \epsilon & 0 \\ 0 & \mu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_p \\ H_p \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \sigma & L_2 \\ L_1 & \sigma^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_p \\ H_p \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Q \\ 0 \end{bmatrix} \right\} dt = 0 \quad (13)$$

위의 식에 시간에 대한 부분적분법을 적용하고 전자계 변수의 초기조건을 적용하면 아래와 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$-(\lambda, \gamma)^T \begin{bmatrix} \sigma & L_2 \\ L_1 & \sigma^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_p \\ H_p \end{bmatrix} - (\lambda, \gamma)^T \begin{bmatrix} Q \\ 0 \end{bmatrix} dt = 0 \quad (14)$$

이때 도입된 보조변수  $(\lambda, \gamma)$ 는 임의의 벡터이므로, 식 (14)의 계산의 편이성을 위하여 다음과 같은 종단조건을 적용하면 식 (14)의 첫 번째 항은 사라지게 된다.

$$\lambda^{E_c}(T_f) = \lambda^{H_c}(T_f) = \lambda^{H_c}(T_0) = 0 \quad (15)$$

또한, 역시간 변화를 하면 또한 각 Step이 진행되는 동안 각각의 항들이 재귀적인 관계를 가지므로 빠르고 정확하게 문제를 해석할 수 있는 장점을 얻을 수 있다.

$$\int_0^{T_f} \left\{ \left[ (\lambda, \gamma)^T \begin{bmatrix} \epsilon & 0 \\ 0 & \mu \end{bmatrix} - (\lambda, \gamma)^T \begin{bmatrix} \sigma & L_2 \\ L_1 & \sigma^* \end{bmatrix} \right] \begin{bmatrix} E_p \\ H_p \end{bmatrix} - (\lambda, \gamma)^T \begin{bmatrix} Q \\ 0 \end{bmatrix} \right\} dt = 0 \quad (16)$$

$$\frac{dF}{dp} = - \int_0^{T_f} (\lambda, \gamma)^T \begin{bmatrix} Q \\ 0 \end{bmatrix} dt \quad (17)$$

앞의 식 (3)과 식 (16),(17)을 비교하면 서로 형태가 동일하므로 다음과 같이 할 수 있으며  $(G_E, G_H)$ 는 식 (19)와 같다.

$$\int_0^{T_f} (G_E, G_H) \cdot (E_p, H_p)^T dt = \int_0^{T_f} \left\{ (\lambda, \gamma)^T \begin{bmatrix} \epsilon & 0 \\ 0 & \mu \end{bmatrix} - (\lambda, \gamma)^T \begin{bmatrix} \sigma & L_2 \\ L_1 & \sigma^* \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} E_p \\ H_p \end{bmatrix} dt = 0 \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} G_E \\ G_H \end{pmatrix}^T &= \begin{pmatrix} \begin{pmatrix} \cdot \\ \lambda \end{pmatrix}^T \begin{bmatrix} \epsilon & 0 \\ 0 & \mu \end{bmatrix} - \begin{pmatrix} \lambda \\ \gamma \end{pmatrix}^T \begin{bmatrix} \sigma & L_1 \\ L_2 & \sigma^* \end{bmatrix} \end{pmatrix}^T \\ &= \begin{bmatrix} \epsilon & 0 \\ 0 & \mu \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \cdot \\ \lambda \end{pmatrix} - \begin{bmatrix} \sigma & L_1 \\ L_2 & \sigma^* \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \lambda \\ \gamma \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (19)$$

위의 식에 앞에서 언급한 것과 같이  $\tau \equiv T_f - t$ 와 이때의 미분 값,  $d/dt = -d/d\tau$ 인 역시간 변환을 이용하면, 식 (20)과 같은 결과를 얻는다.

$$\begin{pmatrix} \overline{G_E} \\ \overline{G_H} \end{pmatrix}^T = \begin{pmatrix} \begin{pmatrix} \cdot \\ \lambda \end{pmatrix}^T \begin{bmatrix} \epsilon & 0 \\ 0 & \mu \end{bmatrix} - \begin{pmatrix} \lambda \\ \gamma \end{pmatrix}^T \begin{bmatrix} \sigma & L_1 \\ L_2 & \sigma^* \end{bmatrix} \end{pmatrix}^T \quad (20)$$

여기서 '-'로 표기된 것은 역시간 적용을 의미한다. 식 (20)을 다시 쓰면, 식 (21)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \epsilon & 0 \\ 0 & \mu \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \cdot \\ \lambda \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma & -L_1 \\ -L_2 & \sigma^* \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \lambda \\ \gamma \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \overline{G_E} \\ \overline{G_H} \end{pmatrix} \quad (21)$$

식 (21)은 식 (12)의 맥스웰 방정식과 형태가 거의 유사하고, 보조변수의 전원은  $(\overline{G_E} \ \overline{G_H})$ 에 의해 생성되며, 미분연산자의 부호가 바뀌는 특성을 이용하면, 보조변수의 값을 구할 수 있다. 따라서, 설계 민감도는 다음과 같다.

$$\frac{dF}{dp} = - \int_0^{\tau_f} \lambda \frac{d\epsilon}{dp} \cdot E dt \quad (22)$$

여기서  $d\epsilon/dp$ 의 항은 역문제 변수  $p$ 가 존재하는 구간에 대해서 값을 갖게 되며, 미분한 값은  $e_p$ 가 된다.

### 2-3. 역산란 문제 해석을 위한 최적화 알고리즘

본 논문에서 사용하는 최적화 방법은 최대 경사도법 (Steepest Descent Method)을 사용한다. 최대경사도법은 반복적으로 역산란문제 변수를 변화시키면서 최적화 점으로 근접해 가는 방법이다[7]-[8].

$$p_{i+1} = p_i + \Delta p_i \quad (23)$$

여기서  $p_i$ 는 현 단계에서의 최적화 변수 벡터,  $p_{i+1}$ 는 새로운 최적화 변수 벡터이고,  $\Delta p_i$ 는 역산란문제 변수의 변화량이다.  $\Delta p_i$ 는 목적함수와 목적함수의 미분정보에 의해 결정되어 진다.

$$p_{i+1} = p_i - \frac{dF/dp}{\|dF/dp\|_2} F \quad (24)$$

따라서, 위의 식을 반복적으로 갱신함에 따라 역산란문제 변수  $p$ 가 원래의 유전 산란체가 가지는 유전율로 수렴하게 되며, 이에 대한 복원 알고리즘을 그림 2에 나타내었다.

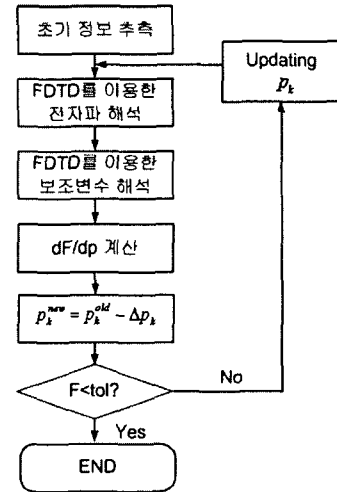


그림 2. FDTD를 이용한 복원 알고리즘 순서도  
Fig. 2. Reconstruction algorithm using the FDTD

본 연구의 타당성을 보이기 위하여 그림 3과 같은 서로 다른 유전율을 갖는 2차원 유전체와 그림 6과 같은 하나의 산란체가 두 가지의 유전율을 가지는 산란체에 대하여 형상 복원을 실시하였다.

유전체의 복원을 위하여 유전체를 포함하는 충분히 큰 복원영역을 설정하였고, 이때 복원영역 내부의 유전체 매질특성은 본 연구의 알고리즘에 의한 추정치를 통해서 계산된다. 그림 3에서 원래의 산란체가 가지는 유전율을 나타내었으며, 그림 4는 50회 반복 후의 추정된 유전율과 형상을 보여

준다. 원 유전체와 매우 흡사함을 볼 수 있다. 그림 5는 복원 반복에 따른 목적함수의 변화를 나타낸 것이다. 20회 반복까지 빠르게 목적함수가 감소하고 그 이후에는 수렴속도가 느려짐을 알 수 있다. 그림 6은 좀 더 해석이 난해한 구조인 한 개의 산란체가 두 가지의 유전율을 가지는 경우에 대한 복원 예제이다. 그림 7은 50회 반복 후의 추정된 유전율과 형상을 보여준다. 두 가지의 유전율을 가지는 산란체 모델에 대해서도 매우 흡사하게 복원됨을 알 수 있다. 그림 8은 복원 반복에 따른 목적함수의 변화를 나타낸 것이다. 10회 반복까지 목적함수의 값이 10% 이내로 줄어들음을 볼 수 있고, 20회 이후로는 1% 이내의 값을 가지게 됨을 알 수 있다.

### III. 해석사례

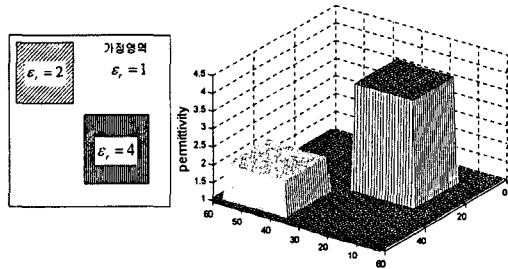


그림 3. 산란체 원모델의 유전체 형상  
Fig. 3. Dielectric Shape of original scatterer

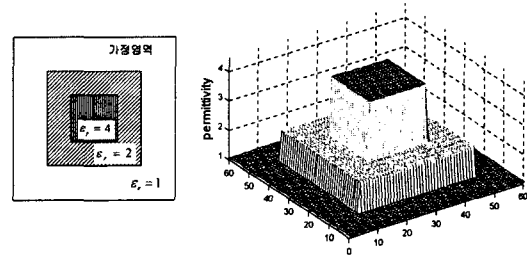


그림 6. 산란체 원모델의 유전체 형상  
Fig. 6. Dielectric Shape of original scatterer

표 1. 다수 산란체 모델의 각 파라미터  
Table. 1. Parameters of multi-scatterer model

파라미터	값
중심주파수[GHz]	10
$\Delta x, \Delta y$ [mm]	1.0
복원되는 영역의 크기	60×60
복원될 개체의 크기	20×20
$N_T$	4
$N_R$	8

표 2. 복합 산란체 모델의 각 파라미터  
Table. 2. Parameters of complex-scatterer model

파라미터	값
중심주파수[GHz]	10
$\Delta x, \Delta y$ [mm]	1.0
복원되는 영역의 크기	60×60
복원될 개체의 크기	40×40
$N_T$	8
$N_R$	8

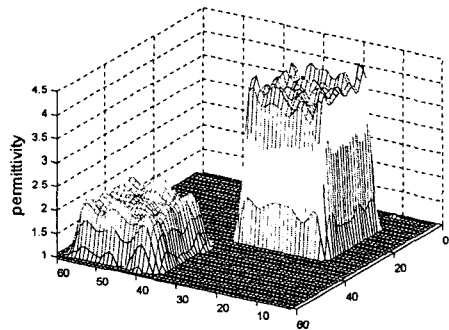


그림 4. 산란체 복원형상(50회 반복 후)  
Fig. 4. Reconstructed shape of scatterer after the 50th iteration

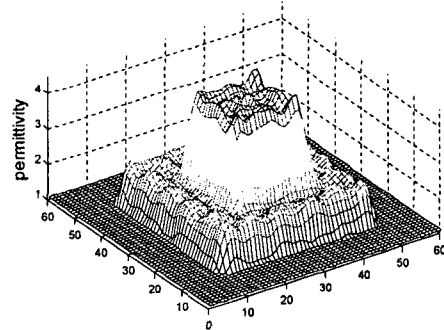


그림 7. 산란체 복원형상(50회 반복 후)  
Fig. 7. Reconstructed shape of scatterer after the 50th iteration

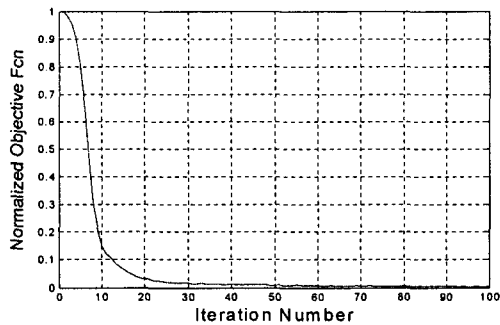


그림 5. 반복횟수에 따른 정규화된 목적함수  
Fig. 5. Normalized Objective Fcn. vs. Iteration

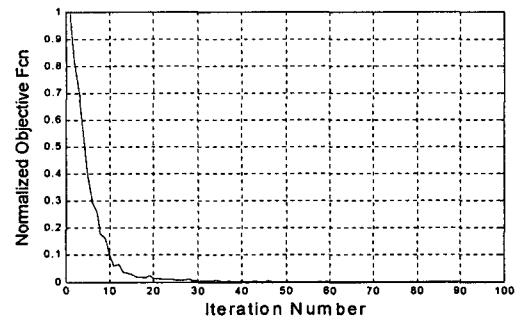


그림 8. 반복횟수에 따른 정규화된 목적함수  
Fig. 8. Normalized Objective Fcn. vs. Iteration

#### IV. 결 론

본 논문에서는 시간영역 유한차분법 (FDTD : Finite-Difference Time-Domain Method)과 설계민감도법 (Design Sensitivity Analysis)을 이용하여 유전체 산란체의 유전율과 형상을 복원하기위한 역산란문제 새로운 해석기법을 제안하였다. 맥스웰 방정식에 보조변수를 취하여, 시간 변화된 보조변수 방정식을 도출하였으며, 이 방정식이 맥스웰방정식의 형태와 유사한 형태를 가짐을 보였다. 또한 다중 및 복합 산란체에 대하여, 역산란 해석을 통해 제안된 기법의 타당성을 입증하였다.

#### 참고문헌

- [1] S. C. Hagness, A. Taflove, and J. E. Bridges, "Three-dimensional FDTD analysis of a pulsed microwave confocal system for breast cancer detection: Design of an antenna-array element," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, vol. 47, pp. 783-791, 1999.
- [2] Kane S. Yee, "Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media", *IEEE AP*, vol.14, No.3, pp.302-307, May 1966.
- [3] S. C. Hagness, A. Taflove, "Computational Electromagnetics"2nd ed. Artech House, 2000.
- [4] E. J. Haug, K. K. Choi, and V. Komkov, *Design Sensitivity Analysis of Structural Systems*. New York: Academic, 1986
- [5] N.-W. Kang, Y.-S. Chung, C. Cheon, and H.-K. Jung, "A new 2-D image reconstruction algorithm based on FDTD and design sensitivity analysis," *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, vol. 50, pp. 2734-2740, 2002.
- [6] J. Berenger, "A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves." *J.Comput. Phys*, vol. 113, pp. 185-200, Oct. 1994
- [7] P.Neittaanmaki, M. Rudnicki, and A.Savini, "Inverse Problems and Optimal Design In electricity and Magnetism," Clarendon press Oxford, 1996
- [8] Y.-S. Chung, C. Cheon, and S.-Y Hahn "Reconstruction of Dielectric Cylinders Using FDTD and Topology Optimization Technique," *IEEE Transactions on*, vol. 36, No. 4, July 2000