

유전체내의 전계를 급수전개로 표시한 각스펙트럼 영역의 역산란 방법

正會員 김 하 철*, 손 현**, 최 현 철**

An Angular Spectral Inverse Scattering Technique with Series-Expanded Field in Dielectric Object

Ha Chul Kim*, Hyon Son**, Hyun Chul Choi** *Regular Members*

요 약

비균질 유전체에 대한 유전율 분포를 재구성하고 역산란 문제의 ill-posed 특성을 줄이기 위하여 확장된 소영역에서 유기전류에 대하여 급수전개된 기저함수를 갖는 모멘트 방법을 적용한 각스펙트럼 영역의 역산란 기법이 제시되었다. 펄스 기저함수를 이용한 각스펙트럼 영역에서 역산란 계산은 산란체의 크기가 커질 경우 고차의 각스펙트럼이 입력으로 사용되어 ill-posedness를 가지게 된다. 고차의 각스펙트럼 수를 줄이기 위하여 산란체의 cell 크기를 확장하고 cell내에서 적절한 중량함수 도입에 의한 ill-posed 특성의 감소는 역산란 문제에서 잡음의 영향을 줄이는데 중요한 역할을 함을 알았다.

Abstract

An angular spectral inverse technique, applying the moment method procedure with a series expansion for the induced field in each enlarged cell, is suggested to reconstruct permittivity profiles of inhomogeneous dielectric objects and to reduce the ill-posedness inherent to inverse scattering problems. The angular spectral inverse scattering using the pulse basis function in enlarging the scatterer has the ill-posedness due to the input data of higher spectra. To reduce the number of higher spectra, enlarging the cell size and averaging over the cell with a suitable weighting function are found to play important roles for the reduction of ill-posedness of the angular spectral inverse scattering problems.

*해군사관학교 전자공학과
Department of Electronics, Naval Academy)

**경북대학교 전자·전기공학부
School of Electronics and Electrical Engineering,
Kyungpook National University
論文番號: 96088-0314
接受日字: 1996年 3月 14日

I. 서 론

전자파 역산란 문제의 수치해석 방법에는 여러가지가 있는데 대표적으로 모멘트 방법이 있다⁽¹⁻³⁾. 모멘트 방법을 이용한 공간 영역에서의 역산란 방법은

물체에 대한 분별력이 과장이하까지 가능한 장점이 있는 반면 측정된 산란파에 잡음이 조금만 첨가되어도 재구성된 유전율 분포의 값이 원래의 유전율 분포와는 큰 차이가 나는 단점이 있다. 이러한 문제점을 보완하기 위해서 파수 영역에서 모멘트 방법을 이용한 방법이 개발되었다⁽⁴⁻⁸⁾.

파수 영역의 역산란 계산식은 산란 전자파의 측정 위치, basis함수의 종류, 소영역의 크기 및 위치등의 영향이 서로 분리되어 표현되므로 산란파의 측정시에 더해지는 잡음이 역계산 과정을 거쳐 구한 유전율의 분포에 미치는 영향을 물리적으로 잘 설명할 수 있어 ill-posedness에 대한 개선책을 찾는 것이 용이하다는 장점이 있다. 그러나 파수영역에서 역산란 과정은 무한 직선상의 산란 전자파를 푸리에 변환하여 산란 전자파의 스펙트럼을 구해야 하는데 실제의 산란 데이터 측정시에는 무한 직선상의 산란 전자파중에서 산란체로부터 먼 거리에 있는 산란 데이터들을 무시하지 않으면 측정 데이터의 양이 무한히 많아지므로 산란파 세기가 충분히 작은 거리내에서 산란 데이터를 제한해야 하는데, 이런 공간적으로 측정시에 제외된 데이터에 의해 오차가 발생할 수 있다. 또한 산란파의 순방향 산란파나 역방향 산란파중에서 하나의 경우에 대해서만 스펙트럼 전개가 가능하기 때문에 파수 영역의 역산란 방법은 산란체의 산란 데이터를 완전히 이용할 수 없는 등의 단점이 있다.

이러한 파수 영역의 데이터 측정에 대한 어려운 점을 해결하고 보다 효과적으로 산란파의 산란 정보를 이용하기 위하여 역산란의 입력 데이터로 사용할 산란 전자파의 측정을 산란체의 모든 방향에서 측정된 데이터를 사용하고 비교적 먼거리의 산란 데이터를 이용할 필요가 없는 산란체 주위를 둘러싼 원주상에서 측정된 산란 전자파를 각도 방향의 스펙트럼으로 전개한 각스펙트럼 영역의 역산란 방법이 개발되었다⁽⁹⁻¹⁰⁾. 이러한 각스펙트럼 영역의 역산란 방법에 의해서 미지의 유전율 분포를 가지는 유전체에 대해 역산란 함으로써 기존의 공간 영역이나 파수 영역에서 모멘트 방법을 적용한 역산란 방법에 비해 잡음의 영향에 훨씬 강한 특성을 나타낸다.

그러나 각스펙트럼 영역의 역산란 계산에서 주된 ill-posedness의 원인은 산란체를 소영역으로 구분했을 때 소영역의 갯수만큼 산란 전자파의 각스펙트럼

을 구해야 하는데, 이때 구한 각스펙트럼의 고차의 스펙트럼의 값이 잡음의 크기보다 작아지기 때문이다. 그래서 산란체의 크기가 커질 경우 역산란의 입력으로 사용할 고차 스펙트럼의 수가 늘어나 산란 전자파의 측정시에 미세한 잡음이 첨가되어도 역산란한 유전율 분포는 많은 오차를 가지게 된다. 이러한 ill-posedness를 제거하기 위하여 각스펙트럼 영역에서 역산란 계산의 입력으로 사용되어지는 고차의 스펙트럼 수를 줄여야 한다.

본 논문에서는 고차의 스펙트럼 수를 줄이기 위하여 산란체의 소영역의 크기를 확장시켜 소영역의 갯수를 줄이고 확장된 소영역내에서 급수전개한 basis함수를 이용하여 역산란을 함으로써 ill-posed 특성을 개선하고자 한다.

II. 각스펙트럼 역산란 이론

그림 1과 같이 z축 방향으로 분극된 평면파 $u^i(\rho)$ 가 임의의 단면 S를 갖는 유전체 기둥에 입사하는 경우 전체 전자파 $u(\rho)$ 는 입사파 $u^i(\rho)$ 와 산란파 $u^s(\rho)$ 의 합으로 $u^s(\rho)$ 는 다음과 같은 적분 방정식으로 표현된다.

$$u(\rho) = u^i(\rho) + u^s(\rho) \tag{1}$$

$$u^s(\rho) = k_0 \iint p(\rho') G(\rho, \rho'; k_0) d\rho'$$

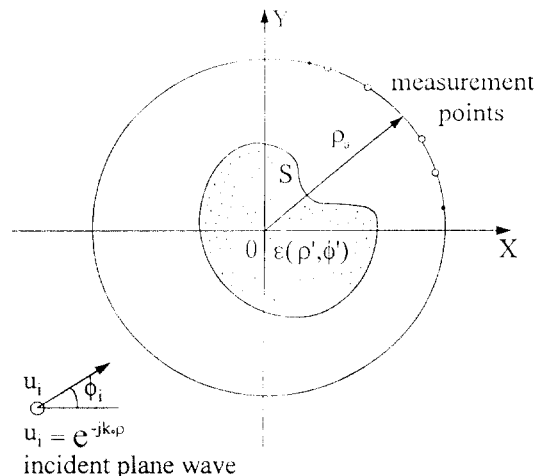


그림 1. 각스펙트럼 영역에서 역산란 구조

Fig. 1. The inverse scattering geometry in angular spectral region

여기서 k_0 는 산란체 외부의 파수(wave number)를 나타내고 $\rho(\rho')$ 은 유전체 내부의 유기 등가전류를 나타내며, $G(\rho, \rho'; k_0)$ 은 2차원 자유공간의 Green 함수이다. 산란 전자파 $u^s(\rho)$ 와 Green 함수 $G(\rho, \rho'; k_0)$ 를 각도 ϕ 에 대해 푸리에 급수로 전개하면 각스펙트럼 영역에서의 전체 전자파의 각스펙트럼 $U(\rho, n)$ 은 입사 전자파의 각스펙트럼 $U^i(\rho, n)$ 과 산란 전자파의 각스펙트럼 $U^s(\rho, n)$ 의 합으로 다음과 같이 표현된다⁽⁹⁻¹⁰⁾.

$$U(\rho, n) = U^i(\rho, n) + U^s(\rho, n) \quad (2)$$

$$U^i(\rho, n) = (j)^{-n} J_n(k_0 \rho)$$

$$U^s(\rho, n) = \frac{-jk_0^2}{4} H_0^{(2)}(k_0 \rho) \iint_S [\epsilon(\rho', \phi') - 1] u(\rho', \phi') J_n(k_0 \rho') e^{jn\phi'} \rho' d\rho' d\phi'$$

여기서 $u(\rho', \phi')$ 은 산란체내의 전체전계를 나타내고 $\epsilon(\rho', \phi')$ 은 산란체 내의 비유전율을 나타낸다. J_n 은 n 차 Bessel 함수를 나타내고 $H_n^{(2)}$ 는 n 차의 제 2종 Hankel 함수를 나타낸다. 식 (2)의 적분 방정식을 수치 계산으로 풀기 위하여 모멘트 방법을 사용하기 위하여 유전체의 단면 S 를 소영역으로 분할한다.

펄스 기저함수를 사용하는 경우 유전체 단면 S 를 $0.1\lambda \times 0.1\lambda$ 이하의 크기를 갖는 소영역으로 나누어야 하는데, 산란체의 크기가 커질 경우 소영역의 수가 늘어나게 되어 역계산시에 필요한 각스펙트럼의 수도 늘어나게 된다. 각스펙트럼 영역의 역산란 계산식에서 가장 주된 ill-posedness의 원인은 산란체의 단면을 소영역으로 나누었을 때 소영역의 갯수만큼 산란 전자파의 각스펙트럼을 구해서 역산란 입력자료로 사용하는데, 이때 구한 각스펙트럼의 고차 스펙트럼의 값이 잡음의 크기보다 작아지기 때문이다. 이러한 이유로 펄스 함수를 이용한 역산란의 계산 경우에는 산란체의 크기가 늘어나면 소영역의 갯수가 늘어나게 되므로 역산란의 입력으로 사용해야 할 각스펙트럼에서 고차 스펙트럼의 수가 늘어나게 되어 그만큼 ill-posed 특성이 강하게 나타난다. 그러므로 역산란시에 잡음의 첨가량이 커지더라도 원래의 유전율 분포를 잘 재구성할 수 있는 유전체 구조는 산란파의 고차 스펙트럼 수는 적고 소영역의 수는 적은 구조라야 한다.

3. 급수전개된 기저함수를 사용한 역산란

본 논문에서는 역산란 계산시에 ill-posed 특성을 갖는 고차 스펙트럼의 수를 줄이기 위해서 산란체의 소영역의 갯수를 줄여야 하는데, 소영역의 수를 줄이기 위하여 그림 2와 같이 산란체의 단면 S 를 비교적 크기가 큰 M 개의 확장된 소영역으로 분할하였다.

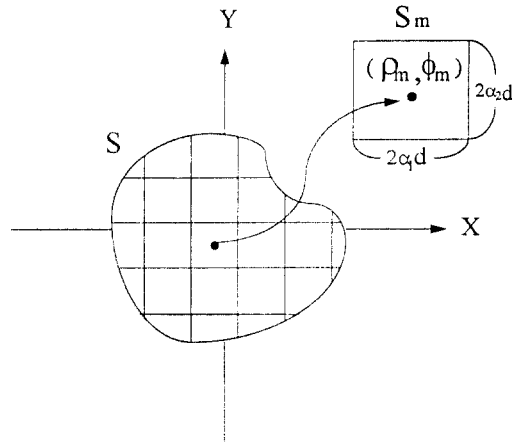


그림 2. M개의 소영역으로 단면 분할
Fig. 2. Cell discretization of cross-section S

소영역 S_m 은 중심이 (ρ_m, ϕ_m) 이고 이 소영역 내에서의 비유전율 $\epsilon(\rho', \phi')$ 의 분포는 소영역의 중심점에서 비유전율 ϵ_m 으로 근사화시킨다. 그러나 확장된 소영역 S_m 에서는 소영역내의 전계 $u(\rho', \phi')$ 를 상수 값으로 볼 수 없으므로 다음과 같은 급수전개 함수로 표시한다.

$$u(\rho', \phi') \approx \sum_{p=-P}^P \sum_{q=-Q}^Q U_{mpq} b_{pq}(\rho', \phi') \text{ in } S_m \quad (3)$$

여기서 $b_{pq}(\rho', \phi')$ 은 basis함수를 나타내고 U_{mpq} 은 basis함수의 계수를 나타낸다. 소영역내의 전계분포는 입사파, 유전체 구조 및 매질분포, 소영역의 위치 등에 따라 변화하므로 구하고자 하는 역산란 문제의 상황에 따라 전개함수의 종류가 달라져야 한다. 어떠한 급수전개된 basis로 소영역내의 전계를 표시할 것인가에 대해서는 실제 주어진 역산란 문제를 수치 계

산을 수행할 때 결정해야 한다. 본 논문에서는 각 소 영역내에서 파동 방정식을 만족하는 $u(\rho', \phi')$ 의 basis함수 $b_{pq}(\rho', \phi')$ 를 다음과 같은 푸리에 급수를 선택하였다.

$$b_{pq}(\rho', \phi') = \exp \left\{ j p \pi \left(\frac{\rho' - \rho_m}{L_1} \right) + j q \pi \left(\frac{\phi' - \phi_m}{L_2} \right) \right\} \quad (4)$$

여기서 L_1, L_2 는 식 (3)이 원래의 전개분포를 재구성할 수 있도록 선택하는 임의 상수이다. 식(4)에서 $p = q = 0$ 으로 취하여 $b_{00}(\rho', \phi') = 1$ 인 경우는 펄스 함수로 전개 $u(\rho', \phi')$ 를 표시한 것이 된다. 그래서 급수전개 함수는 일정한 전개성분($p = q = 0$)과 고조파 성분의 합으로 표현된다. 식 (3)을 식 (2)에 대입하여 정리하면 각스펙트럼 산란과 $U^s(\rho, n)$ 은 다음식으로 나타난다.

$$U^s(\rho, n) = \frac{-jk_0^2}{4} H_0^{(2)}(k_0 \rho) \sum_{m=1}^m \sum_{p=-P}^P \sum_{q=-Q}^Q (\epsilon_m - 1) U_{mpq} 2 L_1 L_2 B_1(\rho, n) B_2(\rho, n) \quad (5)$$

여기서,

$$B_1(\rho, n) = \rho_m \int_{-\frac{\alpha_1 d}{L_1}}^{\frac{\alpha_1 d}{L_1}} e^{j p \pi \rho} J_n[k_0(\rho_m + L_1 \rho)] d\rho$$

$$+ L_1 \int_{-\frac{\alpha_1 d}{L_1}}^{\frac{\alpha_1 d}{L_1}} \rho e^{j p \pi \rho} J_n[k_0(\rho_m + L_1 \rho)] d\rho$$

$$B_2(\rho, n) = e^{-jn\phi_m} \frac{\sin[(q\pi - nL_2) \frac{\alpha_2 d}{L_2}]}{(q\pi - nL_2)}$$

으로 된다.

식 (5)를 식 (2)에 대입하면 다음과 같은 선형 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$[A_m(\rho_0, n_l)] [D_{mpq}] = [U^s(\rho_0, n_l)], \quad l = 1, 2, \dots, T \quad (6)$$

$$[D_{mpq}] = \sum_{m=1}^m \sum_{p=-P}^P \sum_{q=-Q}^Q (\epsilon_m - 1) U_{mpq}$$

$$[A_m(\rho_0, n_l)] = \frac{-jk_0^2}{4} \sum_{m=1}^m \sum_{p=-P}^P \sum_{q=-Q}^Q$$

$$2 L_1 L_2 B_2(\rho, n) B_1(\rho, n)$$

여기서 T는 $M \times (2P + 1) \times (2Q + 1)$ 의 값을 가진다.

식 (6)을 사용하여 유전체의 내부의 비유전율 분포를 재구성하는 과정은 다음과 같다. 첫째, 역산란 입력자료인 각스펙트럼 산란전계로부터 행렬 역변환에 의해 등가 유기전류 계수인 $U_{mpq}(\epsilon_m - 1)$ 을 구한다. 둘째, 등가 유기전류로부터 식 (3)의 유전체 내부의 전계를 구하고 이로부터 급수전개된 전계의 계수 U_{mpq} 를 계산한다. 셋째, 앞에서 구한 등가 유기전류의 계수 $U_{mpq}(\epsilon_m - 1)$ 와 전계 계수 U_{mpq} 로부터 소영역내의 비유전율 ϵ_m 을 구할 수 있는데 다음과 같이 함수형태로 주어진다.

$$\epsilon_m(\rho', \phi') = \frac{\sum_{p=-P}^P \sum_{q=-Q}^Q (\epsilon_m - 1) U_{mpq} b_{pq}(\rho', \phi')}{\sum_{p=-P}^P \sum_{q=-Q}^Q U_{mpq} b_{pq}(\rho', \phi')} + 1, \text{ in } S_m \quad (7)$$

소영역내의 유전율은 하나의 값을 가져야 하므로 다음과 같이 평균을 취한다.

$$\epsilon_m = \frac{\iint_{S_m} \epsilon_m(\rho', \phi') \rho' d\rho' d\phi'}{\iint_{S_m} \rho' d\rho' d\phi'} \quad (8)$$

이와 같은 평균효과에 의하여 고주파 성분의 잡음에 의한 역산란 문제의 ill-posed 특성을 줄일 수 있다.

IV. 수치 계산 및 결과

본 논문에서는 급수전개된 basis를 갖는 모멘트 방법을 적용한 각스펙트럼 영역에서의 역산란 방법에서 잡음이 존재할 경우 미치는 영향 및 ill-posedness의 개선정도를 살펴보기 위하여 실제 수치계산을 수행하였다.

수치계산을 위한 산란체는 그림 3과 같이 산란체의 크기가 커져도 비교적 역산란이 가능한 hollow cylinder 구조로 선택하였다. 유전체의 두께가 입사파의 파장에 비해서 매우 얇다고 하면 ρ 방향의 유전율 분포의 변화는 무시할 수 있고, ρ 방향의 등가 전류원의 변화도 무시할 수 있다. 따라서 유전체의 비유전율과 유기전류값은 각도 ϕ 만의 함수로 근사할 수 있으므로 식 (6)에서 $p = 0$ 으로 하여 ρ 에 대한 변화 성분을 상수

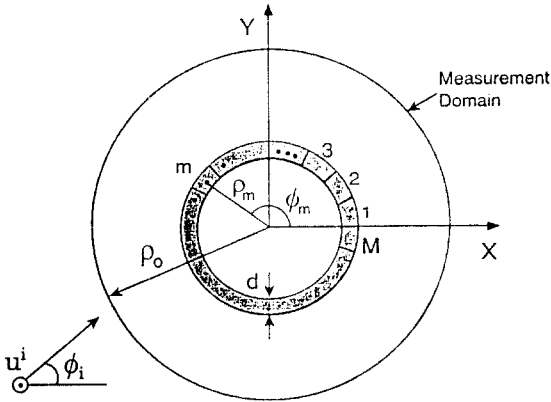


그림 3. 수치계산을 위한 유전체 구조
Fig. 3. The geometry of numerical computation

로 할 수 있다.

본 수치계산에서는 산란체 중심에서 ρ_0 만큼 떨어진 원주상에서 산란 전자파를 계산하여 이를 각도 ϕ 에 대해 푸리에 적분하여 구한 각스펙트럼을 역산란 자료로 사용하였다. 측정된 공간 산란 전자파 $u^s(\rho_0, \phi)$ 로부터 산란 전자파의 각스펙트럼 $U^s(\rho_0, n)$ 을 구하는 식은 다음과 같다.

$$U^s(\rho_0, n) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u^s(\rho_0, \phi) e^{-jn\phi} d\phi \quad (9)$$

역산란시에 구해야 할 역산란 입력 자료의 수는 산란체의 크기에 의해 결정되는데 $n=0$ 부근에서 상대적으로 큰 값을 가진다. 펄스 기저함수를 이용한 역산란에서 입력자료로 쓸 각스펙트럼은 $n=0$ 을 중심으로 한 소영역의 갯수 N 개와 같은 수의 스펙트럼으로 하였고 급수전개를 한 basis함수를 이용한 역산란의 계산에서는 $T(=M \times (2Q + 1))$ 개의 각스펙트럼으로 하였다. 본 수치 계산에서는 펄스 기저함수를 적용한 역산란에서 소영역의 갯수가 N 이고 측정 반경이 ρ_0 인 경우에 이 원주상에서 계산된 10N개의 공간 영역의 산란 전자파를 식(9)에 의해 수치적분으로 하여 각스펙트럼을 구하였다⁽¹¹⁾.

본 수치계산에서 선택한 기본모형은 반경이 $\rho=0.5\lambda$ 이고 두께가 $d=0.1\lambda$ 인 hollow cylinder 유전체를 8개의 확장된 소영역으로 분할하였다. 확장된 각 소영

역의 비유전율값은 1.1, 1.3, 1.5, 1.7, 1.7, 1.5, 1.3 및 1.1로 택하였다. ρ 축 방향으로 두께가 얇기 때문에 펄스 기저함수($p=0$)을 취하고 ϕ 방향으로는 3개의 요소를 갖는 다중 기저함수($Q=1$)로 취하여 수치계산을 하였다. 유전체의 중심에서 $\rho=0.1\lambda$ 인 원주상에서 각스펙트럼 $U^s(\rho, n)$ 은 그림 4와 같이 나타나는데, 그중에서 상대적으로 진폭이 큰 $n=0$ 을 중심으로 24개($n=-11 \sim +12$)의 각스펙트럼을 역산란 입력자료로 사용하였다.

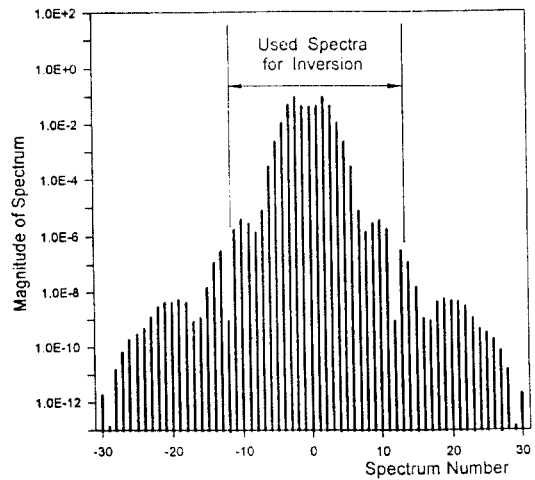


그림 4. 각스펙트럼의 진폭
Fig. 4. Magnitude of Angular Spectra

1) 잡음의 영향

잡음이 역산란 과정에서 미치는 영향을 살펴보기 위해서 수치 계산에 의해 계산된 산란 전자파에 잡음을 첨가하여 역산란 입력으로 사용하였다. 잡음이 첨가된 산란 전계는 다음과 같이 정의한다.

$$u(\rho_0, \phi) = \bar{u}(\rho_0, \phi) + u^n \quad (10)$$

여기서 $\bar{u}(\rho_0, \phi)$ 는 잡음이 포함되지 않은 정확한 산란전계이고, u^n 은 여기에 첨가되는 잡음으로 표준편차가 1이고 평균이 0인 서로 상관관계가 없는 Gaussian random variable로 하였다. 그림 5는 0.1%와 0.4%의

잡음이 주어졌을 때 재구성된 유전율 분포를 나타낸다. Cell내에서 평균을 취하여도 잡음으로 인해 거의 유전율을 재구성할 수 없음을 알 수 있다.

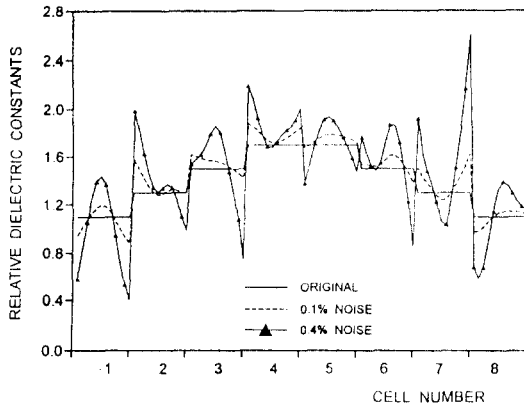


그림 5. 잡음수준의 변화에 따른 재구성된 유전율 분포
Fig. 5. Reconstructed profile according to the noise

소영역내의 전계를 급수 전개한 함으로 표현할 때 전개 계수를 유한하게 취하였으므로 소영역의 경계 부근에서 원래의 전개 분포와 다른 오차를 갖게 되고 이로 인해 재구성된 유전율 분포는 그림 5와 같이 소영역의 경계 부근에서 비교적 큰 오차를 갖게 된다.

2) 중량 함수(Weighting Function)의 도입

잡음이 존재하는 경우 재구성된 유전율 분포는 각 소영역의 경계 부근에서 큰 오차를 갖는다. 이와 같은 오차를 줄이기 위해서는 평균을 취할 때 경계 부근에서의 효과를 감소시키는 중량함수의 도입이 필요함을 알 수 있다. 이 경우 소영역내의 유전율 ϵ_m 을 계산하는 식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\epsilon_m = \frac{\iint_{s_m} \epsilon_m(\rho', \phi') \omega(\rho', \phi) \rho' d\rho' d\phi'}{\iint_{s_m} \omega(\rho', \phi) \rho' d\rho' d\phi'} \quad (11)$$

여기서 $\omega(\rho', \phi')$ 은 중량함수로서 본 논문에서는 다음과 같이 정규 분포함수로 선택하였다.

$$\omega(\rho', \phi') = A \exp\left(-\frac{(\phi' - \phi_m)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (12)$$

여기서 σ 은 정규 분포의 표준 편차를 나타내고 A는 정규분포 함수의 진폭인데 소영역의 면적과 같은 값으로 하였다. 소영역 경계 부근의 잡음의 영향을 regularization하기 위해서는 적절한 표준편차 σ 의 선택이 요구되는데 $\sigma=0$ 인 경우에는 소영역 중심의 재구성 값만을 나타내며 $\sigma=\infty$ 인 경우는 중량 함수의 효과가 없이 단순히 소영역내에서 평균을 취한 결과가 된다. 표 1은 그림 5에서 잡음이 주어진 경우, 펄스 기저 함수를 이용한 경우와 급수전개한 기저함수를 이용했을 때 단순한 평균을 취한 결과와 적절한 σ 를 선택한 중량함수를 이용하여 평균을 취한 결과를 비교하였다.

표 1. 잡음수준에 따른 재구성 오차(T=24인 경우)
Table 1. Reconstruction error according to the noise (T=24)

Noise [%]	Reconstruction Error [%]		
	Pulse Basis (N = 11, 12)	Serise-Expanded Basis (N = 11, 12) M = 8, Q = 1, 0, 1	
		$\sigma = \infty$	$\sigma = 0.19$
0.1	6.91	7.27	0.41
1.0	70.55	70.91	2.04
5.0	743.32	359.49	13.11

다음의 수치 계산은 역산란 계산에서 입력자료로 사용되는 각스펙트럼의 수를 줄여서 선형방정식의 미지수의 갯수를 줄였을 때의 효과를 보기 위하여 산란전계에 N=24개의 소영역으로 분할한 펄스 기저함수를 이용한 역산란 결과와 M=6개의 확장된 소영역으로 분할하고 3개의 요소로 급수전개한 기저함수를 사용한 역산란 결과를 비교하였다. 이때 6개의 확장된 소영역의 유전율 값은 1.3, 1.5, 1.7, 2.0, 2.2 및 1.6으로 선택하였고 소영역내의 전개조절 변수인 L_2 는 0.76을 중량함수 σ 는 0.18으로 하였다. 6개의 확장된 소영역을 이용한 역산란 입력자료의 각스펙트럼은 18개(n = -8 ~ +9)를 선택하였고 24개의 소영역을 이용한 역산란 입력자료인 각스펙트럼은 24개(n = -11 ~ +12)를 선택하였다. 0.1, 1.0, 5.0, 10.0 %의 Gaussian형 잡음이 주어졌을 때의 수치결과를 표 2에 각각 나타내었다.

표 2. 잡음수준에 따른 재구성 오차(T = 18인 경우)
Table 2. Reconstruction error according to the noise
(T = 18)

Noise [%]	Reconstruction Error [%]	
	Pulse Basis (N = -11, 12)	Scrise = Expanded Basis (N = -8, 9) M = -6, Q = -1, 0, 1
0.1	9.38	0.95
1.0	95.40	2.11
5.0	671.83	7.63
10.0	1062.80	15.75

잡음이 1%로 주어졌을때 펄스 기저함수를 사용한 경우에는 90%정도의 재구성 오차를 나타내므로 거의 재구성이 불가능한 반면에 급수전개한 기저함수를 사용한 경우에는 펄스 기저함수인 경우보다 더 적은 수의 18개의 스펙트럼을 사용하여도 재구성 오차는 2% 정도로 주어지므로 원래의 유전율 분포를 거의 정확하게 재구성 할 수 있었다. 이것은 급수전개한 기저함수를 이용한 경우 입력자료로 사용되는 각스펙트럼의 수가 줄어도 역산란의 계산이 가능함을 보여준다.

IV. 결 론

역산란 계산시 입력 데이터로 사용되는 산란전계에 잡음이 존재하는 경우에 각스펙트럼 영역의 역산란 방법을 급수 전개된 기저함수를 갖는 모멘트 방법을 적용시켜 수치 계산을 하여 유전율 분포를 재구성한 결과 역산란 문제에서 발생하는 ill-posed 특성을 개선 할 수 있었다.

이는 소영역의 크기를 크게 취함으로써 원래 구하고자 하는 비유전율 분포의 스펙트럼 중 고주파 성분이 줄어들어 잡음의 영향이 감소하기 때문이다. 또한 제시한 역산란 방법의 평균효과에 의해 잡음의 영향으로 인해 생긴 고주파 성분의 오차를 제거할 수 있었다. 그러나 역산란 계산시 소영역의 중심부근에서 역산란 계수를 구하므로 소영역의 경계부근에서 재구성 오차가 커지며 유전체 내의 전계를 유한한 급수의 합으로 표현하기 때문에 소영역의 경계부근에서

재구성 오차가 커지는데 이러한 오차를 줄이기 위해서 소영역 중앙의 값을 소영역의 경계에 값보다 크게 weighting을 주어 평균을 한 결과 잡음에 의한 ill-posedness를 거의 제거할 수 있었다.

본 논문에서는 weighting 함수를 도입함으로써 잡음의 영향에 의한 ill-posed 특성을 제거할 수 있었으나 실제 역산란 문제에서 역산란 상황에 가장 적절한 weighting 함수를 취하는 방법에 대한 연구가 필요하다. 또한 간단한 2차원 유전체 구조에 대해서 살펴보았으나, 제시된 역산란 방법을 확장하기 위하여 여러 가지 형태의 유전체 구조에 대한 연구가 필요하다고 본다.

참 고 문 헌

1. S. A. Johnson, T. H. Yoon and J. W. Ra, "Inverse scattering solutions of the scalar Helmholtz wave equation by a multiple source Moment Method," *Electron. lett.*, vol. 19, pp. 130-132, 1983.
2. 김세윤, 이재민, 나정웅, "모멘트 방법을 이용한 새로운 역산란 계산방법, I: 이론," *전자공학회지*, 제 25권, 제3호, pp. 6-14, 1988.
3. 김세윤, 윤태훈, 나정웅, "모멘트 방법을 이용한 새로운 역산란 계산방법, II: 잡음 의 영향," *전자공학회지*, 제25권, 제4호, pp. 15-24, 1988.
4. 김세윤, 이재민, 나정웅, "파수영역에서 모멘트 방법을 이용한 새로운 역산란 계산 방법, I: 이론," *전자공학회지*, 제25권, 제10호, pp. 1-9, 1988.
5. 이재민, 김세윤, 나정웅, "파수영역에서 모멘트 방법을 이용한 새로운 역산란 계산 방법, II: 수치계산," *전자공학회지*, 제25권, 제10호, pp. 10-17, 1988.
6. S. Y. Kim, H. C. Choi, J. W. Ra and S. Y. Lee, "Electromagnetic imaging of 2-D inhomogeneous dielectric objects by an improved spectral inverse technique," *IEEE Trans. Mgan.*, vol. MAG-26, pp. 634-637, 1990.
7. S. Y. Kim, H. C. Choi, J. M. Lee and J. W. Ra, "Inverse scattering scheme based on the moment method in the spectral domain, part I: Theory," *Ultrasonic Imaging*, vol. 14, pp. 16-28, 1992.

8. H. C. Choi, S. Y. Kim and J. W. Ra, "Inverse scattering scheme based on the moment method in the spectral domain, part II: Numerical simulation," Ultrasonic Imaging, vol. 14, pp. 29-39, 1992.
9. 이경수, 김세윤, 나정웅, "산란 전자파의 각스펙트럼 전개에 의한 역산란," 대한전 자공학회 추계종합학술대회 논문집, 제13권 제 2호, 1990년 11월 30일, 고려대학교.
10. K. S. Lee and J. W. Ra, "Angular spectral inverse for reconstruction of complex permittivity profiles," Microwave and Optical Tech. Lett., vol. 5, no. 8, 1992.
11. M. Abramowitz and I. A. Stegun, Eds., Handbook of mathematical functions with formulas, graphics and mathematical tables, New York: Dover, 1972.



金 河 澈(Ha Chul Kim) 정회원
 1963년 3월 9일생
 1985년 2월: 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사)
 1990년 2월: 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)
 1990년 3월~현재: 경북대학교 대학원 박사과정
 1993년 1월~현재: 해군사관학교 전자공학과(전임강사)



孫 鉉(Hyon Son) 정회원
 1935년 5월 27일생
 1960년 8월: 연세대학교 전기공학과 졸업(공학사)
 1975년 8월: 한양대학교 통신공학과 졸업(공학석사)
 1984년 8월: 경희대학교 전자공학과 졸업(공학박사)
 1977년 4월~현재: 경북대학교 전자·전기공학부(교수)

崔 眩 鍊(Hyun Chul Choi) 정회원
 제 21권 제 1호 참조
 1960년 2월 2일생
 1982년 2월: 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사)
 1984년 2월: 한국과학기술원 전기·전자공학과 졸업(공학석사)
 1989년 2월: 한국과학기술원 전기·전자공학과 졸업(공학박사)
 1990년 3월~현재: 경북대학교 전자·전기공학부(부교수)