

공진산란이론을 이용한 원통형 산란체에 대한 전자기파문제의 역산란 이론

論 文

55C-3-7

Solution of the Inverse Electromagnetic Scattering Problem for Cylindrical Objects by Using the Resonance Scattering Theory

鄭 勇 華* · 全 相 鳳** · 安 昌 會†

(Yonghwa Jung, Sangbong Jeon, Chang-Hoi Ahn)

Abstract - The resonances that contain the information on the properties of the scattering target can be used for target reconstruction approaches. The inverse scattering theory for the resonances has been applied to the problems of the scattering for a spherical, cylindrical dielectric objects and dielectrically coated conductors, shown reasonable results. Though by using this method the thickness and the dielectric constants of the target can be obtained from a determination of the spacing and of the widths of the scattering resonances, the radius of the target should be given. In this paper, we suggest the improved inverse theory combined with the resonance scattering theory to obtain the radius in addition to the dielectric constant of the target. The applications of this method for scattering problems of electromagnetic waves from cylindrical targets were accomplished, and it shows its validity.

Key Words : Resonance, Inverse Theory, Resonance Scattering Theory

1. 서 론

전자기파에 대한 역산란 이론[1][2]은 입사된 전자기파에 의해 산란체의 산란장으로부터 산란체에 대한 모양, 위치, 매질 분포 등을 얻기 위한 이론이다. 이러한 역산란 문제는 지하탐사, 원격탐사, 레이더 영상, 의료진단, 비파괴 검사 등에 응용될 수 있다. 역산란 기법으로 수학적 방법을 이용할 수 있으나, 수학적 복잡성과 산란파의 모든 주파수 성분을 정확히 측정해야 하는 어려움이 있다. 수치 계산 방법으로는 산란파를 계산하는 모멘트 방법의 과정을 역으로 적용하여 위치, 모양, 매질 분포 등을 구할 수 있으나 유전체의 크기가 사용파장에 비해 매우 크면 계산 용량이 많아지는 단점이 있다[3].

한편 산란체의 모양과, 매질 특성에 관계되는 산란장의 공진스펙트럼 이용한 역산란 방법이 개발되어 왔는데, 이 방법에서는 한정된 측정 주파수 범위에서 산란장의 공진 스펙트럼으로부터 공진주파수와 공진폭을 이용하여 산란체에 대한 정보를 얻을 수 있다. 공진스펙트럼을 얻기 위한 이론적 기법으로 SEM(singularity expansion method)[4], 공진산란 이론[5] 등이 있다. SEM은 포복파(creeping waves)의 이론에 의해 산란장의 공진주파수를 복소 주파수 영역에서 나타내는 이론이고, 공진산란이론은 실수 영역의 주파수에서 산란장이 공진성분과 비공진성분으로 구성되어 있다고 가정한다.

이론이다. 공진산란이론은 유전체와 같이 투과성 산란체에 의한 산란장의 공진스펙트럼을 얻기 위해서 적합하고, SEM은 공진현상이 감쇠에 의해 잘 보이지 않는 완전도체에 의한 산란장 문제의 공진산란문제에 보다 더 적합하다.

지금까지의 연구에서는 주로 산란체의 크기를 알고 있는 경우에 전자기파 산란 문제에 공진을 이용한 역산란 이론을 적용하여 그 산란체의 비유전율, 유전체 코팅의 두께비 등을 역으로 얻을 수 있었으나[6][7], 산란체의 크기를 모를 경우의 역산란 연구는 발표되지 않았다. 기존의 공진이론을 이용한 역산란 방법에서는 산란체의 크기와 주파수의 곱으로 표현한 무차원 주파수를 사용하여 해를 구하기 때문에 크기 정보가 필요하다. 따라서 지하의 공동산란체등과 같이 크기를 알 수 없는 산란체인 경우는 이 방법을 적용할 수 없다. 본 연구에서는 기존의 역산란 이론과 공진산란이론을 결합한 개선된 방법을 제안하여 이러한 문제를 해결하였다. 주파수 영역에서 공진을 이용한 역산란이론을 적용하면 산란체의 매질 특성과 크기정보가 결합된 값을 구할 수 있는데, 이들 값을 크기정보와 매질의 특성으로 분리한 다음 공진산란이론에 적용하여 공진스펙트럼을 얻는다. 미지의 산란체의 매질 특성은 공진스펙트럼의 공진폭으로부터 얻을 수 있다. 또한 계산된 매질의 특성을 역산란 이론에 적용하여 산란체 크기 정보를 얻을 수 있다.

본 논문에서는 제안한 방법의 검증을 위해 무한히 긴 원통형 산란체의 전자기파 산란 문제에 적용하였다. 우선, 임의의 무한히 긴 원통형 모델을 미지의 산란체로 가정하고, 이를 공진산란이론에 적용시켜 산란스펙트럼으로부터 역산란의 적용에 필요한 공진스펙트럼의 공진주파수와 공진폭을 구하였다. 여기서 주어진 공진스펙트럼은 미지의 산란체로부터 얻을 수 있는 값으로 가정할 수 있다. 모의 실험결과

† 교신저자, 正 會 員 : 영남대학교 전자정보공학부 교수

E-mail : chahn@yu.ac.kr

* 正 會 員 : 영남대학교 강의전담교수

** 正 會 員 : 영남대학교 전자공학과 박사과정

接受日字 : 2005年 11月 17日

最終完了 : 2006年 12月 9日

에서는 제안한 방법을 적용하여 산란체의 비유전율 뿐만 아니라 크기정보를 얻고, 미지의 산란체의 정보와 수치계산되어 얻어진 값이 부합함을 확인한다.

2. 공진산란이론

평면 전자기파가 반경 a 인 무한히 긴 원통형 산란체를 향해 원통축(z)에 수직방향인 $-x$ 방향으로 입사할 때, 전계가 원통축에 대하여 수평인 TM모드인 경우 원통형 좌표계에서 산란장을 식(1)과 같이 Rayleigh정규모드로 표현할 수 있다. 이때 시간항을 $e^{-i\omega t}$ 를 기준으로 하였다.

$$E^s = E^i \parallel \sum_{n=0}^{\infty} \alpha_n (-i)^n R_n H_n^{(1)}(k_1 r) \cos n\phi \quad (1)$$

여기서 $k_1 = \omega \sqrt{\mu_1 \epsilon_1}$ 이고, μ_1, ϵ_1 은 각각 외부매질의 비투자율과 비유전율이다. α_n 은 모드 $n=0$ 일 때 1이며, $n > 0$ 일 때 2이다. $H_n^{(1)}$ 은 모드 n 인 원통형 1종 Hankel함수이다. 식(1)에서 R_n 는 산란계수로서 경계조건에 의해 구할 수 있다. R_n 을 산란체의 크기와 특성(비유전율, 비투자율)에 대한 함수인 정규화된 임피던스를 포함한 식으로 표현하면 식(2)와 같다[8].

$$R_n = - \frac{J_n(x_1) - iZ_n J_n'(x_1)}{H_n^{(1)}(x_1) - iZ_n H_n^{(1)'}(x_1)} \quad (2)$$

여기서 $x_1 = k_1 a$ 이고, iZ_n 은 정규화된 임피던스이다. 균일 매질의 원통형 산란체인 경우 임피던스는 식(3)과 같이 주어진다.

$$iZ_n = \frac{k_1 \mu_2}{k_2 \mu_1} \frac{J_n(x_2)}{J_n'(x_2)} \quad (3)$$

여기서 $x_2 = k_2 a$ 이고, $k_2 = \omega \sqrt{\mu_2 \epsilon_2}$ 이다. $\mu_2, \epsilon_2 = \mu_1$ 과 ϵ_2 는 각각 산란체의 비투자율과 비유전율이다. J_n 은 원통형 1종 Bessel함수이고, J_n' 는 인수 $k_2 a$ 에 대한 미분을 나타낸다.

공진산란이론은 산란장이 입사파의 주파수에 따라 매우 급격히 변하는 공진(resonance)성분과 비교적 서서히 변하는 배경(background)성분으로 이루어진다는 가정에 근거를 두고 있다. 공진산란이론을 적용하기 위해 주어진 산란계수 R_n 을 부분파 산란함수로 표현하면 식(4)로 정의된다.

$$S_n = 1 + 2R_n \quad (4)$$

식(4)의 부분파산란함수 S_n 을 unitarity(=1)조건에 의해 식(5)와 같이 배경성분과 공진성분의 부분파산란함수의 곱으로 표현할 수 있다[9].

$$S_n = S_n^{(b)} S_n^{(reso)} \quad (5)$$

여기서, $S_n^{(b)}$ 와 $S_n^{(reso)}$ 를 다음 식으로 정의한다.

$$S_n^{(b)} = 1 + 2R_n^{(b)} \quad (6)$$

$$S_n^{(reso)} = 1 + 2R_n^{(reso)} \quad (7)$$

여기서, $R_n^{(b)}, R_n^{(reso)}$ 는 각각 배경성분으로 적용될 모델의 산란계수와 공진 산란계수이다. 공진산란이론에 의하면, 그림 1과 같이 산란체의 모델이 유전체 ($\epsilon_1 < \epsilon_2$)인 경우에는 배경산란계수는 산란체의 비유전율이 $\epsilon_2 = \infty$ 인 산란체의 산란계수를 사용하며, 공동체 ($\epsilon_1 > \epsilon_2$)인 경우는 $\epsilon_2 = 0$ 인 산란체의 산란계수를 배경산란계수로 적용한다 [10].

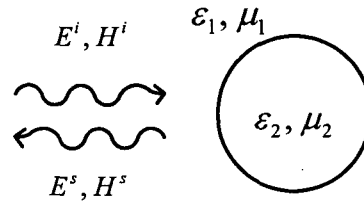


그림 1. 원통형 산란체 (유전체 ($\epsilon_1 < \epsilon_2$), 공동 ($\epsilon_1 > \epsilon_2$))
Fig. 1. Cylindrical scatterer (Dielectric ($\epsilon_1 < \epsilon_2$), Cavity ($\epsilon_1 > \epsilon_2$))

배경산란계수 $R_n^{(b)}$ 를 식(6)에 대입하면 공진산란계수 $R_n^{(reso)}$ 는 식(5)를 이용하여 구할 수 있다.

$$R_n^{reso(1)} = \frac{-\Delta_n}{z_n^{(1)} - 1/iZ_n} \quad (8)$$

$$R_n^{reso(2)} = \frac{-1/\Delta_n}{1/z_n^{(1)} - iZ_n} \quad (9)$$

여기서 $R_n^{reso(1)}, R_n^{reso(2)}$ 는 각각 유전체와 공동체에 대한 공진산란계수이고, $z_n^{(l)} = H_n^{(l)}(x_1)/[H_n^{(l)'}(x_1)]'$ ($l=1, 2$)이고, Δ_n 는 $z_n^{(1)}$ 의 허수 성분이다.

공진 주파수 근처에서 식(8)과 식(9)는 테일러급수 전개에 의해 핵산란의 공진수식인 Breit-Wigner형태의 수식으로 근사시킬 수 있다.

$$R_n^{reso(1)} = \frac{-1/2\Gamma_n^{(1)}}{x_1 - x_n^{(1)} + 1/2\Gamma_n^{(1)}}, \quad (10)$$

$$R_n^{res(2)} = \frac{-1/2\Gamma_n^{(2)}}{x_1 - x_n^{(2)} + 1/2\Gamma_n^{(2)}} \quad (11)$$

여기서 $x_n^{(1)}$ 과 $x_n^{(2)}$ 는 모드 n 에서 각각 유전체와 공동체에 대한 공진주파수이고, $\Gamma_n^{(1)}$, $\Gamma_n^{(2)}$ 는 각각 유전체와 공동체에 대해 다음과 같이 정의되는 공진폭이다.

$$\Gamma_n^{(1)} = -2\Delta_n^{(1)}/\beta_n^{(1)} \quad (12)$$

$$\Gamma_n^{(2)} = -2\Delta_n^{(2)}/\beta_n^{(2)} \quad (13)$$

식(12)와 식(13)에서 $\beta_n^{(1)}$, $\beta_n^{(2)}$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\beta_n^{(1)} = \frac{d}{dx_1} [1/iZ_n - \text{Re}(1/z_n^{(1)})]_{x_1=x_n^{(1)}} \quad (14)$$

$$\beta_n^{(2)} = \frac{d}{dx_1} [iZ_n - \text{Re}(z_n^{(1)})]_{x_1=x_n^{(2)}} \quad (15)$$

여기서 $\text{Re}(\)$ 는 그 함수의 실수값을 의미한다.

3. 역산란 이론

원통형 산란체의 산란문제에서 산란계수의 분모가 0이 특성 방정식은 식(2)로부터 식(16) 또는 식(17)로 주어진다.

$$\frac{H_n^{(1)'}(x_1)}{H_n^{(1)}(x_1)} = 1/iZ_n \quad (16)$$

$$\frac{H_n^{(1)}(x_1)}{H_n^{(1)'}(x_1)} = iZ_n \quad (17)$$

주어진 특성방정식의 해는 복소 고유주파수를 가지는데, 공진영역에서 고유주파수의 허수성분의 크기는 작은 값을 가지기 때문에, 고유주파수의 실수 값은 실수 영역의 공진주파수와 근사한 값을 가진다. 즉 특성방정식의 해는 공진주파수가 된다. 여기서 식(16)과 식(17)의 해는 TM 모드에서 각각 유전체 모델과 공동체의 모델의 공진주파수가 된다.

식(16)의 좌변항은 $x \gg n$ 일 때 원통형 Bessel, Hankel함수의 근사식을 이용하면 식(18)로 표현된다.

$$\frac{H_n^{(1)'}(x_1)}{H_n^{(1)}(x_1)} \simeq -\frac{1}{2x_1} - i \quad (18)$$

또한 임피던스를 나타내는 식(16)의 우변항은 다음식과 같이 근사화 된다.

$$1/iZ_n = \frac{k_2}{k_1} \frac{J_n'(x_2)}{J_n(x_2)} \simeq -\frac{k_2}{k_1} \frac{1}{2x_2} - \frac{k_2}{k_1} \tan\left(x_2 - \frac{\pi}{4} - \frac{n\pi}{2}\right) \quad (19)$$

여기서 $k_2/k_1(1/x_2) = 1/x_1$ 이고, 산란체가 손실이 없는 경우에 iZ_n 는 실수 값을 가진다. 따라서 특성방정식(16)은 식(18)과 식(19)에 의해 다음 관계식으로 주어진다.

$$k_2/k_1 \tan\left[x_2 - \frac{1}{2}\left(n + \frac{1}{2}\right)\pi\right] = \text{Re}(i) = 0 \quad (20)$$

식(20)의 해를 구하면 식(21)과 같다.

$$(x_2)_{n,l} = \frac{1}{2}\pi(2l + n + \frac{1}{2}) \quad (21)$$

여기서 n 은 정수이며 n 은 모드를 나타내고 l 은 n 모드에서의 차수이다. 식(21)에서 한 모드에서 연속된 두 공진주파수(x_2)의 관계는 식(22)로 나타내진다.

$$(x_2)_{n,l+1} - (x_2)_{n,l} = \pi \quad (22)$$

위의 식(22)에서 $\epsilon_1 = 1$ 이고, $\mu_1 = \mu_2$ 일 때, $x_2 = \sqrt{\epsilon_2}x_1$ 이므로, x_1 의 항으로 표현하면 다음과 같다.

$$(x_1)_{n,l+1} - (x_1)_{n,l} = \pi/\epsilon_2^{1/2} \quad (23)$$

식(23)에 보여주듯이 한 모드에서 연속된 두 공진 주파수(x_1)의 차이에 의해 산란체의 비유전율 ϵ_2 을 얻을 수 있다.

한편 산란체가 공동($\epsilon_1 > \epsilon_2$)인 경우에는 특성방정식(17)을 근사시키면 식(24)로 표현할 수 있고,

$$k_1/k_2 \cot\left[x_2 - \frac{1}{2}\left(n + \frac{1}{2}\right)\pi\right] = \text{Re}(i) = 0 \quad (24)$$

위의 식으로부터 마찬가지로 식(22)와 같은 해를 얻을 수 있다.

식(23)에서 $x_1 = 2\pi fa/u_1$ 를 이용하여 무차원 주파수 x_1 를 주파수 f 로 표현하면 다음과 같다.

$$(f_2 - f_1) = \frac{u_1}{2a} \sqrt{\epsilon_2} \quad (25)$$

여기서 위상속도 $u_1 = 1/\sqrt{\mu_1\epsilon_1}$ 이고, f_2 와 f_1 는 동일 모드에서 연속된 공진주파수를 나타낸다. 위 식(25)에서 주어진 공진주파수의 간격으로부터 $\sqrt{\epsilon_2}a$ 를 얻을 수 있다. 따라서 아래 식(26)과 같이 미지의 산란체의 반경과 비유전율의 제곱근의 곱이 수치계산을 위해 설정한 값과 일치하는 경우에는 미지의 산란체로부터 주어진 공진주파수의 간격과 수치계산으로 얻은 공진주파수의 간격은 동일하게 된다.

$$\sqrt{\epsilon_2^{(u)}}a^{(u)} = \sqrt{\epsilon_2^{(c)}}a^{(c)} \quad (26)$$

여기서 첨자(u)는 미지의 값이고, 첨자(c)는 수치계산을 위해 사용한 값이다.

한편 식(21)로부터 미지의 산란체의 무차원 공진주파수 $x_2^{(n)}$ 과 역산란 방법을 이용하여 얻은 공진주파수 $x_2^{(c)}$ 의 모드 n 과 지수 β 동일하면 다음 관계가 있다.

$$x_2^{(n)} = x_2^{(c)}, \quad \frac{\sqrt{\epsilon_1^{(u)}} a^{(u)} 2\pi}{u_1} f^{(n)} = \frac{\sqrt{\epsilon_1^{(c)}} a^{(c)} 2\pi}{u_1} f^{(c)} \quad (27)$$

여기서 식(26)에 의해 미지의 산란체의 공진주파수 $f^{(n)}$ 과 수치계산된 공진주파수 $f^{(c)}$ 는 같은 값을 가진다.

식(12)로 정의된 공진폭을 $x \gg n$ 인 경우 근사화 하면 식(28)로 표현할 수 있다.

$$\Gamma_n^{(1)}(x_1) \approx \cos^2(x_2^{(1)} - 1/2(n+1/2)\pi) / \epsilon_2 \quad (28)$$

공진산란이론은 무차원 주파수 x_1 영역에서 공진스펙트럼을 나타낸 것으로 이를 주파수 f 영역으로 변환하면 공진폭은 다음과 같이 표현된다.

$$\Gamma_n^{(1)}(f) \approx \frac{\cos^2(\sqrt{\epsilon_2} 2\pi a f^{(1)} / u_1 - 1/2(n+1/2)\pi) u_1}{2\pi a \sqrt{\epsilon_2}} \times \frac{1}{\sqrt{\epsilon_2}} \quad (29)$$

여기서 $f^{(1)}$ 은 유전체 모델의 공진주파수를 나타낸다. 마찬가지로 산란체가 공동인 경우인 식(13)의 근사식은 다음과 같이 주어진다.

$$\Gamma_n^{(2)}(x_1) \approx \sin^2(x_2^{(1)} - 1/2(n+1/2)\pi) \quad (30)$$

위 식(30)을 주파수의 함수로 표현하면 다음과 같다.

$$\Gamma_n^{(2)}(f) \approx \frac{\sin^2(\sqrt{\epsilon_2} 2\pi a f^{(2)} / u_1 - 1/2(n+1/2)\pi) u_1}{2\pi a \sqrt{\epsilon_2}} \times \sqrt{\epsilon_2} \quad (31)$$

식(29)와 식(31)은 식(26)과 식(27)을 만족하면 미지의 산란체의 공진폭과 수치계산된 공진폭의 비는 각각 다음 관계식으로 표현된다.

$$\frac{\Gamma_n^{(1)}(f)^{(c)}}{\Gamma_n^{(1)}(f)^{(n)}} = \frac{\sqrt{\epsilon_2^{(u)}}}{\sqrt{\epsilon_2^{(c)}}} \quad (32)$$

$$\frac{\Gamma_n^{(2)}(f)^{(c)}}{\Gamma_n^{(2)}(f)^{(n)}} = \frac{\sqrt{\epsilon_2^{(c)}}}{\sqrt{\epsilon_2^{(u)}}} \quad (33)$$

식(32)와 식(33)은 TM모드에서 각각 미지의 산란체가 유전체인 경우와 공동체인 경우에 비유전율을 얻기 위한 식이다. 이로부터 식(25)에 계산된 비유전율을 대입하여 반경을 얻을 수 있다.

TE모드의 공진산란이론과 역산란이론의 전개는 iZ_n 을 식(34)로 주어지는 어드미턴스 iY_n 로 두고 전개할 수 있다.

$$iY_n = \frac{k_1 \epsilon_2}{k_2 \epsilon_1} \frac{J_n(x_2)}{J_n'(x_2)} \quad (34)$$

TE모드인 경우 공진산란계수와 역산란이론의 수식은 TM모드의 유전체 모델과 공동체 모델의 수식이 서로 교환된 형태를 가진다.

4. 수치해석 결과

본 연구에서는 무한히 긴 원통형 산란체를 비유전율에 따라 유전체와 공동으로 나누어 미지의 산란체로 가정하여 역산란 이론에 적용하였다. 역산란을 적용하기 위해 한 모드 ($n=2$)에서 연속된 두 공진 주파수가 필요한데, 이는 음향학에서 사용되는 MIRR실험법[11]등을 전파산란에 적용하여 구할 수 있다. 여기서는 공진산란 이론을 적용하여 수치계산으로부터 얻었고 표 1에 나타내었다. 여기서 외부매질의 비유전율은 $\epsilon_1=1$ 이고, 미지의 산란체의 비유전율과 반경은 각각 유전체 모델인 경우에는 $\epsilon_2^{(u)}=7.5$, $a^{(u)}=2.5$ 로, 공동체 모델인 경우에는 $\epsilon_2^{(u)}=0.47$, $a^{(u)}=15$ 로 설정했다. 수치계산 결과에서는 여기서 주어진 비유전율과 반경을 미지의 값으로 가정하고 역산란 방법으로 얻은 값들과 비교하여 검증하였다.

표 1. 모의 계산에 의한 산란체 모델의 공진 주파수와 공진폭

Table 1. Resonance frequencies and widths for trial objects

모델		공진 주파수		공진폭 $\Gamma_n(f)^{(n)} (\times 10^8)$
		$f_1 (\times 10^8)$	$f_2 (\times 10^8)$	
유전체	TM mode	22.83965	23.05870	0.05044
	TE mode	22.94910	23.16820	0.05069
공동	TM mode	23.15585	23.30175	0.06180
	TE mode	23.08290	23.22880	0.06203

본 연구에서 제시한 역산란 방법은 다음과 같은 순서로 수행하였다.

1. 표 1의 공진주파수를 역산란 이론에 적용하여 산란체의 반경과 비유전율이 결합된 값을 얻음.
2. 결합된 값을 임의의 반경과 비유전율로 분리하여 비유전율에 따라 유전체 모델과 공동체 모델로 나눔.
3. 분리된 반경과 비유전율을 공진산란이론에 적용하여 공진스펙트럼을 얻음.

4. 수치계산된 공진주파수와 표 1의 공진주파수와 근사한 값을 가지는 모델을 선택.
5. 수치계산된 공진폭과 표 1의 공진폭을 이용하여 비유전을 계산
6. 계산된 비유전율을 이용하여 역산란 이론에 적용하여 반경계산.

실제 미지의 산란체에 역산란 방법을 적용하기 위해서는 산란체의 비유전율 값을 모르기 때문에 적용할 모델을 유전체와 공동체인 산란체를 모두 고려해야 한다. 즉 반경에 따라 산란체의 비유전율 값을 각각 유전체 ($\epsilon_1 < \epsilon_2$)와 공동 ($\epsilon_1 > \epsilon_2$)인 모델로 설정할 수 있다. 그림 2는 표 1에 주어진 유전체 모델의 TM모드 공진주파수를 역산란이론에 적용하여 얻은 값을 임의의 반경과 비유전율로 분리한 후 공진산란이론에 적용하여 계산한 결과이다. 산란체의 반경을 $a^{(c)}=1$ 로 가정한 경우 식(25)에 적용하면 산란체의 비유전율은 $\epsilon_2^{(c)}=46.8917$ 이 되고, $a^{(c)}=10$ 인 경우 $\epsilon_2^{(2)}=0.468917$ 이 된다. 실선과 점선은 각각 산란체의 비유전율이 $\epsilon_2^{(c)}=46.8917$ 인 유전체 모델과 $\epsilon_2^{(2)}=0.468917$ 인 공동체 모델을 공진산란이론에 적용하여 얻은 공진스펙트럼을 나타낸다.

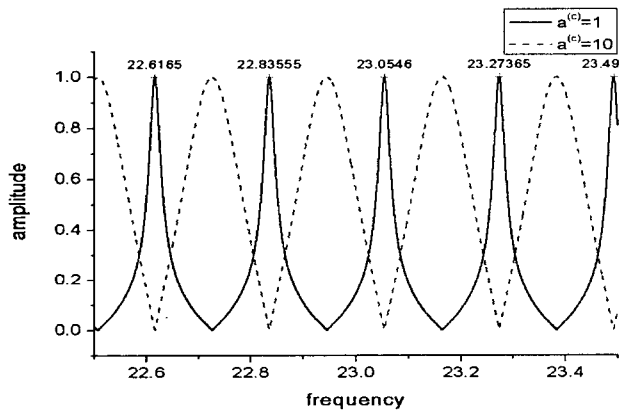


그림 2. 역산란 이론을 적용한 공진스펙트럼 (유전체의 TM 모드)

Fig. 2. The modal resonances by using the inverse theory (TM mode of dielectric object)

결과에서 실선이 표 1의 공진주파수와 근사한 값을 가지므로 산란체의 모델은 유전체 모델임을 알 수 있다. 표 1의 공진주파수와 계산된 공진주파수의 오차는 역산란 이론에서 특성방정식을 $x \gg n$ 인 경우에 근사된 식을 이용하여 반경과 비유전율이 결합된 값을 얻기 때문에 나타난다. 선택된 모델로부터 공진스펙트럼의 공진폭을 식(32)에 대입하면 미지의 산란체의 비유전율 값을 구할 수 있다. 그림 2에서 실선의 공진폭은 $\Gamma_n^{(1)}(f)^{(c)} \simeq 0.02022$ 이므로, 미지의 산란체의 비유전율은 $\epsilon_2^{(2)} \simeq 7.535$ 이다. 또한 식(25)을 이용하여 반경을 구하면 $a^{(w)} \simeq 2.495$ 이다.

그림 3은 TE모드의 공진주파수를 역산란 방법에 적용한 결과이다. 실선과 점선은 각각 산란체의 반경이 $a^{(c)}=1$ 이고, 비유전율이 $\epsilon_2^{(c)}=46.8703$ 인 모델과, 반경이 $a^{(c)}=10$ 이고, 비유전율이 $\epsilon_2^{(2)}=0.468703$ 인 모델을 공진산란이론에 적용하여 계산한 결과이다. TE모드에서도 실선의 경우가 타당함을 알 수 있다. 그림 2에서 실선의 공진폭 ($\Gamma_n^{(1)}(f)^{(c)} \simeq 0.02027$)을 이용하여 미지의 산란체의 비유전율을 계산하면 $\epsilon_2^{(w)} \simeq 7.4948$ 이고, 이로부터 반경을 계산하면 $a^{(w)} \simeq 2.5$ 이다.

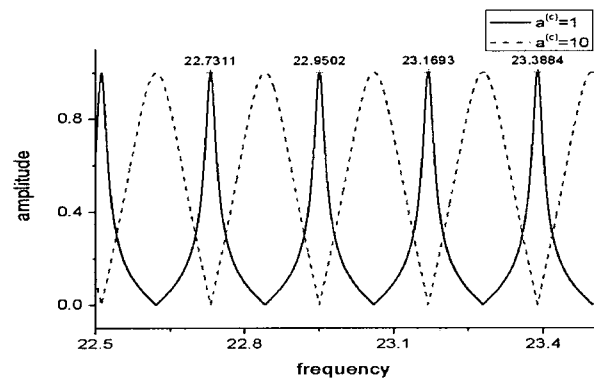


그림 3. 역산란 이론을 적용한 공진스펙트럼 (유전체의 TE 모드)

Fig. 3. The modal resonances by using the inverse theory (TE mode of dielectric object)

그림 4와 그림 5는 공동체 모델에 제안한 방법을 적용한 결과이다. 표 1에 주어진 공진주파수를 역산란 방법에 적용하면, 반경이 $a^{(c)}=2$ 일 때 비유전율은 $\epsilon_2^{(c)}=26.4248$ 이고, $a^{(c)}=20$ 일 때 $\epsilon_2^{(c)}=0.264248$ 이다.

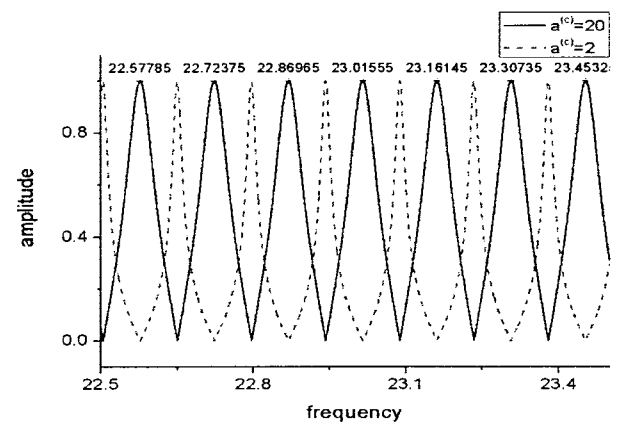


그림 4. 역산란 이론을 적용한 공진스펙트럼 (공동체의 TM 모드)

Fig. 4. The modal resonances by using the inverse theory (TM mode of cavity)

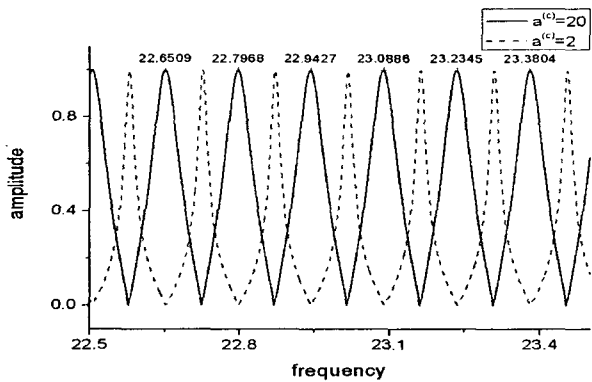


그림 5. 역산란 이론을 적용한 공진스펙트럼 (공동체의 TE 모드)

Fig. 5. The modal resonances by using the inverse theory (TM mode of cavity)

그림 4와 그림 5의 결과에서 실선의 공진주파수 값이 제시한 주파수와 근사한 값을 가지므로 산란체의 모델은 공동체 모델이다. 그림 4와 그림 5에서 공진스펙트럼의 공진폭은 각각 $\Gamma_n^{(2)}(f)^{(c)} \approx 0.04658$, $\Gamma_n^{(2)}(f)^{(c)} \approx 0.04728$ 이므로 계산된 미지의 산란체의 비유전율은 TM모드에서는 $\epsilon_2^{(u)} \approx 0.465$ 이고, TE모드에서는 $\epsilon_2^{(u)} \approx 0.4518$ 이다. 또한 비유전율로부터 반경을 계산하면 각각 $a^{(u)} \approx 13.64$, $a^{(u)} \approx 15.2955$ 이다. 표 2에서 수치계산에서 얻은 결과와 가정된 미지의 산란체 모델의 비유전율과 반경을 비교하여 나타냈다.

표 2. 미지의 산란체 정보와 역산란 계산결과 비교.

Table 2. Comparison between information of unknown objects and reconstructed values by using the inverse theory

모델		가정된 미지의 산란체		계산된 값	
		비유전율	반경	비유전율	반경
유전체	TM mode	7.5	2.5	7.5350	2.495
	TE mode			7.4948	2.5
공동	TM mode	0.47	15	0.4650	13.640
	TE mode			0.4518	15.296

5. 결 론

본 연구에서는 기존의 공진 주파수를 이용한 역산란이론에 공진산란이론을 결합한 개선된 방법을 원통형 산란체에 대한 전자기파 문제에 적용하였다. 기존의 공진을 이용한 역산란이론에서는 산란체의 크기를 알고 있는 경우에만 적용되었으나, 제안된 역산란 이론법을 이용하면 유전율정보와 크기정보를 각각 구할 수 있다. 수치계산 결과에서 산란체의 비유전율과 크기정보를 얻고 제시한 모델의 정보와 비교

하여 타당성을 검증하였다. 본 연구에서 제시한 방법은 원통형 산란체에 대한 전자기파 문제 뿐만 아니라 구형 산란체에 대한 산란 문제로 확대 적용할 수 있을 것으로 사료된다. 또한 공진성분을 추출하기 위해 음향학에서 개발된 MIIR[11]등의 실험방법이 전자기파 문제에서 구현이 된다면, 지하탐사, 비파괴 검사등 다양한 역산란 문제에 적용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R05-2002-000-01220-0)지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] Special issue on inverse methods in electromagnetics, IEEE Trans. Antenna and Propagat., vol. 29, no. 2, 1981.
- [2] 김세운, "전자파 산란 및 역산란 문제의 해석 기법", 한국전자파학회, Vol 2, No 4, pp. 39-46, 1991.
- [3] Ghodgaonkar, D.K., Gandhi, O.P., Hagmann, M.J., "Estimation of Complex Permittivities of Three-Dimensional Inhomogeneous Biological Bodies," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-31, pp. 442-446, 1983.
- [4] L. B. Felsen, Transient electromagnetic fields, "The Singularity expansion method," Springer, Berlin pp. 129-179, 1976.
- [5] L. Flax, L. R. Dragonette, H. Uberall, "Theory of elastic resonance excitation by sound scattering", J. Acoust. Soc. Am. 63, pp. 723-731, 1978.
- [6] G. Gaunard and H. Uberall, "Resonance of dielectrically coated conducting spheres and the inverse scattering problem," J. Appl. Phys. 52(1), pp. 293-297, 1981.
- [7] G. Gaunard and H. Uberall, "Solution of the inverse electromagnetic scattering problem in the resonance case", IEEE Trans. Antenna and Propagat., vol. 29, no.2, pp. 293-297, 1981.
- [8] D. E. Barrick, Radar Cross Section Handbook, PLENUM Press. Vol. 1, New York, 1970.
- [9] M.-S. Choi, "New formulation of the resonance scattering theory," J. Acoust. Soc. Am. 101, pp. 2491-2495, 1997.
- [10] 정용화, 전상봉, 안창희, "투과성 구형 산란체에 대한 전자기파 공진산란이론의 배경성분," 대한전기학회 논문집 Vol. 54C, No. 8, pp. 384-389, 2005.
- [11] Jean Ripoché and Gerard Maze, "A new spectroscopy: The resonance scattering spectroscopy by the method of isolation and identification of resonances (MIIR)," in Acoustic Resonance Scattering(ed. by H. Uberall, Gordon and Breach, Philadelphia, 1992), Chapter 5.

저 자 소 개



정용화 (鄭勇華)

1970년 12월 24일생. 1994년 영남대 공과대학 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 영남대학교 누리사업단 강의전담교수

Tel : 053-810-3930 Fax : 053-810-4629
e-mail : brave70@yumail.ac.kr



전상봉 (全相鳳)

1974년 1월 7일생. 2000년 영남대학교 공과대학 전기전자공학부 졸업, 2003년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 2006년 현재 동 대학원 전자공학과 박사 과정.

e-mail : jsb0107@yumail.ac.kr



안창희 (安昌會)

1985년 서울대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1992년 한국 과학 기술 연구원 (KAIST) 졸업(공학박사). 1997년 미국 Illinois University post-doc. 2004년 Duke대 방문교수, 현재 영남대학교 전자정보공학부 교수

e-mail : chahn@yu.ac.kr