

다층 쌍이방성 매질 코팅 원통에 대한 전자파 산란 해석

정희원 이상목*, 엄상진**, 윤중한**

Electromagnetic wave scattering by bianisotropically coated cylinder : exact solution

Sang-Mok Lee, Sang-Jin Eom, Joung-Han Yoon *Regular Members*

요약

본 논문에서 쌍이방성 매질로 코팅된 무한 길이 완전도체 원통에 대한 이방향(bistatic) 전자파 산란을 연구하였다. 설정된 모델은 무한길이 완전도체 원통에 무손실 쌍이방성 매질로 코팅하고, 두께를 무시할 수 있는 불연속층으로 덮은 형태이다. 본 논문은 첫째, 쌍이방성 매질에 대한 전자파 산란현상을 연구했고, 두 번째, 전자계 경계조건에서 연속조건을 만족하지 않도록 하는 불연속층의 존재여부가 전자파 산란에 미치는 영향을 관찰했으며, 마지막으로 임의 입사 편파각도에 대한 산란 결과들을 비교했다. 산란방정식을 구하기 위해서 각 매질에서의 전자계 방정식을 유도했고 경계조건을 이용, 각 방정식의 미지계수들을 구할 수 있었다.

ABSTRACT

In this paper, the electromagnetic wave scattering from a bianisotropically coated cylinder is formulated by using the wave functions for bianisotropic media and the boundary-value method. The problem is two-dimensional and the solutions to arbitrary polarization angles are presented. The results for various geometrical and electrical parameters on bistatic scattering cross-section are presented.

1. 서론

전자파 산란의 문제는 매우 다양한 분야에서 응용된다. 도시 구조물에 의한 이동전화의 난청지역 발생과 TV 수신장애, 인체에 대한 전자파와 방사선의 산란 및 흡수(SAR), 레이더에 잡히지 않는 미사일이나 항공기의 설계, 산란을 줄이기 위한 안테나 코팅^[1], 여러 개의 산란체에 대한 다중산란, 도파로 산란 등이 그러한 예이다. 이러한 산란문제를 해석하기 위해 여러 가지 방법들이 제시 되었지만, 산란체의 구조가 복잡해지거나 매질의 특성이 다양해지는 경우에는 해석상의 어려움이 뒤따른다. 최근에는 이러한 복잡한 매질 중 쌍이방성 매질에 대한 산란, 방사, 및 유도에 관한 문제가 관심의 대상이 되어 왔는데, 이는 쌍이방성 매질이 초고주파 분야에서

갖는 잠재적인 실제 응용가능성 때문이다. 그 응용 분야로는 흡수체나 산란감소 코팅제, 구조탐사에서 의 적용 등을 들 수 있다. 쌍이방성 매질의 특성은 전계에 의해 분극 되고 자계에 의해 자화 되는 이방성 유전체나 자성체와는 달리 전계나 자계 둘 중 한가지만 인가하여도 분극과 자화가 이루어지는 쌍이방성 매질의 구성 관계식으로부터 출발한다. 이 특성은 1959, Dzylaloshinskii가 antiferromagnetic 매질에 대해 예언했고, 그 후 Astrov가 Cr_2O_3 에서 그 특성(electromagnetic)을 측정해 냈다. 또한 ferromagnetic 매질의 gallium iron oxide 뿐만 아니라 물이 이온화 되어 인체의 대부분을 구성하는 DNA가 포함되는 Chiral media에서도 이와 같은 현상이 증명되었다. 이 밖에도 원통에 대한 산란문제는 이들을 적당히 배열함으로써 다양한 실제의 산

* 재능대학 정보통신과(smlee@mail.jnc.ac.kr)

** 인하대학교 전파/광통신 연구실(g1981720@inhavision.inha.ac.kr)
논문번호: T00028-0816, 접수일자: 2000년 8월 16일

란체들을 쉽게 모델링 할 수 있기 때문에 이에 대한 연구가 오랫동안 지속되어 왔고, 현실적인 산란체의 모델링을 위해서 다층구조의 산란체에 대한 연구가 계속되고 있다. 특히, 다층 실린더의 기본구조로서 2층의 동축 실린더에 대한 산란특성은 다양한 방법으로 연구되어 왔다^{[7],[9]}. 쌍이방성 매질에서의 전자계 방정식을 얻기 위해 Hung-Yu David Yang 이 연구한 “쌍이방성 기관 코팅 원통형 마이크로 스트립에서의 방사특성”^[2]에 대한 수치해석을 응용했다. 이를 토대로 완전도체, 쌍이방성 매질 제 1층, 불연속층의 다층구조의 산란체를 모델링 할 수 있었다. H.assoudi 와 N.J Damaskos 가 이방성 매질 코팅층과 불연속층으로 싸인 원통구조에 대한 전자계 경계조건을 이용해서 정확한 해석을 하였고^[4], J.Cesar Monzon 과 Nickander J. Damaskos 는 1986년 이방성 원통에 대한 전자파 산란을 연구했으니^[5], 쌍이방성 매질 코팅 위에 실제 산란체 적용을 위해 설계한 불연속층을 씌운 모델은 지금까지 없었다. 본 논문에서는 논문^[4]과 같은 구조의 다층 원통 이지만 코팅매질을 이방성에서 쌍이방성으로 확장 시킨 모델을 선택하여 그 수치해석 결과를 관찰했다. 수치해석은 각 층에 대한 전자계 방정식을 구하고 각 경계에서 발생하는 경계조건을 이용, 미지의 산란계수를 구한 후, 정확한 산란 방정식을 유도해냈다. 결과는 각 층의 매질특성(유전율, 투자율, 어드미턴스 등)과 전자계의 특성(사용주파수, 입사분극각도, 산란각도 등)에 따라 이방향 산란계수(SCS : Scattering Cross Section)를 도시하였다.

II. 수치해석

원통의 단면은 그림 2.1에서 보는 것과 같이 반지름, $\rho = a$ 의 완전도체 원통과 두께, $b-a$ 의 쌍이방성 코팅층, 그리고 두께를 무시할 수 있는 쌍이방성 불연속층으로 이루어져 있다.

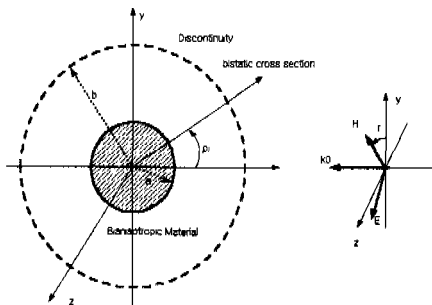


그림 2.1 무한원통구조

이 무손실 쌍이방성 매질(Kong 1975, $\overline{\zeta}^* = -\overline{\eta}^*$)은 다음의 구성관계식으로 정의된다^[2].

$$\overline{D} = \overline{\epsilon E} + \overline{\zeta H} \tag{2.1}$$

$$\overline{B} = \overline{\mu H} - \overline{\eta E} \tag{2.2}$$

또한, 위 식(2.1), (2.2)의 일축성 쌍이방성 매질에 대한 유전율과 투자율에 관한 구성행렬은 다음과 같다.

$$\overline{\epsilon} = \epsilon_0 \begin{bmatrix} \epsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_1 & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_2 \end{bmatrix} \tag{2.3}$$

$$\overline{\mu} = \mu_0 \begin{bmatrix} \mu_1 & 0 & 0 \\ 0 & \mu_1 & 0 \\ 0 & 0 & \mu_2 \end{bmatrix} \tag{2.4}$$

$$\overline{\zeta} = c_0^{-1} \begin{bmatrix} 0 & \zeta & 0 \\ \zeta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{2.5}$$

$$\overline{\eta} = c_0^{-1} \begin{bmatrix} 0 & \eta & 0 \\ \eta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{2.6}$$

C_0 는 자유공간에서의 전자파 전파속도이다. 위 조건에서 식 (2.5)-(2.6)의 ζ 는 순허수이다. 또한 본 논문의 쌍이방성 불연속층은 표면 어드미턴스 텐서인 $\overline{\eta}$ 로 정의 되는데, $\overline{\eta}$ 는 다음과 같다.^[2]

$$\overline{\eta} = \begin{bmatrix} \eta_2 & 0 \\ 0 & \eta_3 \end{bmatrix} \tag{2.7}$$

η_2 는 ϕ 방향 요소이고 η_3 는 z 방향 요소이다.

먼저, 원거리에서의 전자계 수치해석을 위해 2차원적 모델에 대한 각 영역별 관계식을 유도하였다. 다음은 쌍이방성 매질 코팅층에서 맥스웰 방정식이다.

$$\nabla \times \overline{E} = -j\omega(\overline{\mu H} - \overline{\eta E}) \tag{2.8}$$

$$\nabla \times \overline{H} = j\omega(\overline{\epsilon E} + \overline{\zeta H}) \tag{2.9}$$

결국 식 (2.8)과 (2.9)의 결과로 다음 쌍이방성 코팅층에서의 전자계 방정식을 구할 수 있다. ($a \leq \rho \leq b$)

$$E_{\phi 1} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} (-j)^n \left[\frac{(gk_0 + k_z)n}{k_0^2 \epsilon_1 \alpha \rho} E_{z1} - \frac{1}{j\omega \epsilon_0 \beta} \frac{\partial H_{z1}}{\partial \rho} \right] e^{jn\phi} \quad (2.10)$$

$$H_{\phi 1} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} (-j)^n \left[\frac{(gk_0 + k_z)n}{k_0^2 \mu_1 \beta \rho} H_{z1} + \frac{1}{j\omega \mu_0 \alpha} \frac{\partial E_{z1}}{\partial \rho} \right] e^{jn\phi} \quad (2.11)$$

$$E_{z1} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} (-j)^n [A_{n1} H_n^{(2)}(k_p \rho) + B_{n1} J_n(k_p \rho)] e^{jn\phi} \quad (2.12)$$

$$H_{z1} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} (-j)^n [C_{n1} H_n^{(2)}(k_q \rho) + D_{n1} J_n(k_q \rho)] e^{jn\phi} \quad (2.13)$$

이때,

$$k_p = k_0 \sqrt{\epsilon_2 \alpha}, \quad \alpha = \mu_1 + \frac{\zeta^2}{\epsilon_1} - \frac{k_z^2}{k_0^2 \epsilon_1} \quad (2.14)$$

$$k_q = k_0 \sqrt{\mu_2 \beta}, \quad \beta = \epsilon_1 + \frac{\zeta^2}{\mu_1} - \frac{k_z^2}{k_0^2 \mu_1} \quad (2.15)$$

미지계수 A_{n1} , B_{n1} , C_{n1} , D_{n1} 들을 구하기 위해 원통 밖에서의 전자계 방정식을 구했다. ($\rho \geq b$)

$$E_z' = \sum_{n=-\infty}^{\infty} (-j)^n [\cos r J_n(u_0) + B_n^s H_n^{(2)}(u_0)] e^{jn\phi} \quad (2.16)$$

$$H_z' = \sum_{n=-\infty}^{\infty} (-j)^n [Y_0 \sin r J_n(u_0) + D_n^s H_n^{(2)}(u_0)] e^{jn\phi} \quad (2.17)$$

$$E_{\phi}' = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{j\omega \epsilon_0} [Y_0 \sin r J_n'(u_0) + D_n^s H_n^{(2)'}(u_0)] e^{jn\phi} \quad (2.18)$$

$$H_{\phi}' = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{j\omega \mu_0} [\cos r J_n'(u_0) + B_n^s H_n^{(2)'}(u_0)] e^{jn\phi} \quad (2.19)$$

이때, ρ 는 z 축으로부터의 직선거리이고 k_0 는 자유공간에서의 파수이며 Y_0 는 자유공간에서의 전체와 자계에 대한 어드미턴스이다. 또한 r 은 y 축으로부터 z 축으로의 편파각도이다. 이들 관계식은 다음의 여섯 가지 전자계 경계조건을 통해 미지계수들을 구하고 식 (3.1)의 산란계수에 대한 결과를 도출한다.

$$(1) \quad [E_z]_{\rho=a} = 0$$

$$(2) \quad [E_z' - E_{z1}]_{\rho=b} = 0$$

$$(3) \quad [E_{\phi 1}]_{\rho=a} = 0$$

$$(4) \quad [E_{\phi}' - E_{\phi 1}]_{\rho=b} = 0$$

$$(5) \quad [H_{\phi}' - H_{\phi 1}]_{\rho=b} = \eta_3 [E_z']_{\rho=b}$$

$$(6) \quad [H_z' - H_{z1}]_{\rho=b} = \eta_2 [E_{\phi}']_{\rho=b}$$

조건 (5), (6)은 $\rho = b$ 의 불연속층에 기인하고 η_2 , η_3 는 불연속층의 방향성분별 어드미턴스이다. 결국 다음의 계수들을 통해 산란계수를 유도했다.

$$B_n^s = \frac{\nabla_1 A_{n1} - \cos r J_n(k_0 b)}{H_n^{(2)}(k_0 b)} \quad (2.20)$$

$$D_n^s = \frac{j\omega \epsilon_0 [\nabla_3 C_{n1} - Y_0 \sin r J_n(k_0 b)] - \eta_2 Y_0 \sin r J_n'(k_0 b)}{j\omega \epsilon_0 H_n^{(2)}(k_0 b) + \eta_2 H_n^{(2)'}(k_0 b)} \quad (2.21)$$

III. 산란계수

본 논문의 이방향 산란계수는 다음과 같다.

$$\frac{\sigma(\phi)}{\lambda_0} = \frac{2}{\pi} \left[\left| \sum_{n=-\infty}^{\infty} B_n^s \exp(jn\phi) \right|^2 + \left| \sum_{n=-\infty}^{\infty} D_n^s \exp(jn\phi) \right|^2 \right] \quad (3.1)$$

λ_0 는 자유공간에서의 파장이다.

IV. 수치해석결과

쌍이방성 매질로 코팅된, 불연속층을 가진 원통에 대한 이방향 산란계수를 전자계 방정식을 통해 임의 편파각도에 따라 해석했다. 그림3.1는 쌍이방성 매질 코팅의 유무에 따른 산란결과이다. 이는 TE파 입사를 가정했고, 표면 불연속층이 없는 경우(M13)는 수식상의 어드미턴스 성분을 0이라 가정했다. 그림에서 볼 수 있듯이 불연속층은 전체 산란량과 산란각도에 대한 산란량을 변화 시켰고, 그림상에는 미소하지만 전체적인 산란을 감소시키는 작용이 있음을 확인하였다.

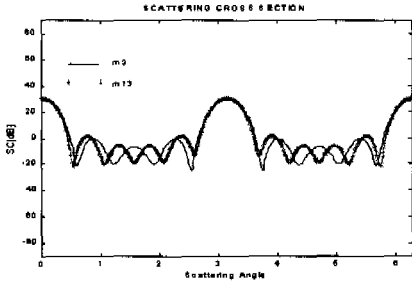


그림 3.1 불연속층 유무에 따른 산란계수 비교

$$k_0a = 100\pi, k_0b = 120\pi, \epsilon_1 = 1.8, \epsilon_2 = 3.0$$

$$M3 : \mu_1 = 2.0, \mu_2 = 3.5, \zeta = 1.8I, \eta_2 = 2.8, \eta_3 = 3.7$$

$$k_0a = 100\pi, k_0b = 120\pi, \epsilon_1 = 1.8, \epsilon_2 = 3.0$$

$$M13 : \mu_1 = 2.0, \mu_2 = 3.5, \zeta = 1.8I, \eta_2 = 0, \eta_3 = 0$$

그림3.2는 TE나TM 입사가 아닌 임의의 입사 편파 각도에 대한 산란결과를 보여준다. 산란각도에 대한 산란은 결과에서 확인할 수 있듯이, 변화하지만 전체적인 산란량에는 큰 변화가 없음을 확인하였다.

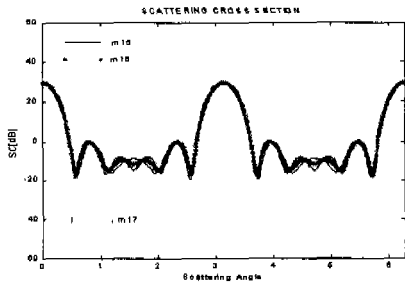


그림 3.2 입사 편파각도에 따른 산란계수 비교

$$k_0a = 100\pi, k_0b = 120\pi, \epsilon_1 = 1.8, \epsilon_2 = 3.0$$

$$\mu_1 = 2.0, \mu_2 = 3.5, \zeta = 1.8I, \eta_2 = 2.8, \eta_3 = 3.7$$

$$M15 : r = \pi/6, M16 : r = \pi/4, M17 : r = \pi/3$$

V. 결론

쌍이방성 매질로 코팅된 완전 도체원통에 대한 이방향 산란계수를 각종 파라미터와 임의의 입사편파 각도의 변화에 따라 해석했다. 본 논문에서 사용된 쌍이방성 매질은 균질한 무손실 일축성이고, 매질 밖에 위치한 불연속층 역시 쌍이방성 매질임을 가정했다. 수치해석은 각 매질에 대한 적분함수와 미분함수의 전자계 방정식을 경계조건에 적용해서 미

지계수들을 구한 다음, 산란 방정식을 유도한 정확한 해석법을 선택했으며, 그 결과를 각종 파라미터의 변화에 따라 도시했다. 그 파라미터로서 유전율, 투자율, 주파수, 불연속층의 어드미턴스, 층의 두께 등이 언급되었다. 전사모의 실험결과, 층의 두께변화와 불연속층 특성의 변화, 사용한 주파수의 변화, 그리고 쌍이방성 매질내부의 나머지 파라미터들의 변화는, 입사편파각도에 따라 산란의 크기와 방향을 변화 시켰고 이들의 조절로 전체 산란을 줄였으며 산란각도에 대한 산란량을 변화 시켰고, 무산란각도의 범위 또한 제어할 수 있었다. 또한 TM파는 각종 파라미터들의 변화에 TE파 보다 민감하게 반응함을 관찰했다. 전자파의 산란을 조절할 수 있는 방법으로 크게 구조설계와 매질의 선택을 감안할 때, 쌍이방성 매질의 산란해석은 그 응용가능성이 매우 크다고 할 수 있다. 구성관계식이 복잡하여 수치해석을 통한 정밀한 해석이 어렵고 알고리즘의 미완성으로 시뮬레이션을 할 수 있는 정확한 틀이 개발되지 않은 현실에서 부단한 연구와 노력이 기울여져야 될 분야라고 생각한다. 또한 쌍이방성 매질의 해석은 최근 대두되고 있는 인체모델과도 밀접한 관련이 있으므로 전자파 환경을 위한 실제 인체 팬텀을 제작할 경우나, 이를 정확히 수치해석 하는데 꼭 필요한 과정이다. 끝으로 일축성을 가정해 해석한 본 논문에서 나아가 이축성 쌍이방성 매질에 대한 연구는 아직 남아있는 과제임을 밝혀둔다.

VI. 부록

다음은 수치해석 중 발생한 치환계수들이다.

$$\nabla_1 = H_n^{(2)}(k_p b) - \frac{H_n^{(2)}(k_p a)}{J_n(k_p a)} J_n(k_p b) \quad (6.1)$$

$$\nabla_2 = H_n^{(2)'}(k_q b) - \frac{H_n^{(2)'}(k_q a)}{J_n(k_q a)} J_n'(k_q b) \quad (6.2)$$

$$\nabla_3 = H_n^{(2)}(k_q b) - \frac{H_n^{(2)'}(k_q a)}{J_n(k_q a)} J_n(k_q b) \quad (6.3)$$

$$\nabla_4 = H_n^{(2)'}(k_p b) - \frac{H_n^{(2)}(k_p a)}{J_n(k_p a)} J_n'(k_p b) \quad (6.4)$$

$$\alpha_1 = \frac{j\omega\epsilon_0\beta(gk_0 + k_z)n\nabla_1}{k_0^2\epsilon_0\alpha b} \quad (6.5)$$

$$\beta_1 = \frac{j\beta\omega\epsilon_0\nabla_3 H_n^{(2)'}(k_0b)}{j\omega\epsilon_0 H_n^{(2)}(k_0b) + \eta_2 H_n^{(2)'}(k_0b)} - \nabla_2 \quad (6.6)$$

$$\gamma_1 = \frac{[j\omega\epsilon_0 J_n(k_0b) + \eta_2 J_n'(k_0b)]\beta Y_0 \sin r H_n^{(2)'}(k_0b)}{j\omega\epsilon_0 H_n^{(2)}(k_0b) + \eta_2 H_n^{(2)'}(k_0b)} \quad (6.7)$$

$$\alpha_2 = \eta_3 \nabla_1 + \frac{\nabla_4}{j\omega\mu_0\alpha} - \frac{\nabla_1 H_n^{(2)'}(k_0b)}{j\omega\mu_0 H_n^{(2)}(k_0b)} \quad (6.8)$$

$$\beta_2 = \frac{(\mathcal{G}k_0 + k_z)n\nabla_3}{k_0^2 \mu_1 \beta b} \quad (6.9)$$

$$\gamma_2 = \frac{1}{j\omega\mu_0} \left[\cos r J_n'(k_0b) - \frac{\cos r J_n(k_0b) H_n^{(2)'}(k_0b)}{H_n^{(2)}(k_0b)} \right] \quad (6.10)$$

$$A_{n1} = \frac{\beta_2 \gamma_1 - \beta_1 \gamma_2}{\alpha_1 \beta_2 - \alpha_2 \beta_1} \quad (6.11)$$

$$C_{n1} = \frac{\alpha_2 \gamma_1 - \alpha_1 \gamma_2}{\alpha_2 \beta_1 - \alpha_1 \beta_2} \quad (6.12)$$

참 고 문 헌

[1] Jin Au Kong, "Electromagnetic Wave Theory" 1990 by John Wiley & Sons, Inc.
 [2] Hung-Yu David Yang and Piergiorgio L.E.Uslenghi, "Radiation Characteristics of Microstrip Antennas on Cylindrical Bianisotropic Substrates." Electromagnetics, 15:499-511, 1995
 [3] Constantine A. Balanis "Advanced Engineering Electromagnetics "1989, by John Wiley & Sons, Inc.
 [4] H.assoudi and N.J,Damaskos, "Scattering by a composite and anisotropic circular Cylindrical structure: Exact Solution" Electromagnetics 8:71-83, 1988
 [5] J.Cesar Monzon and Nickander J. Damaskos, "Two-Dimensional Scattering by a Homogeneous Anisotropic Rod." IEEE Vol.AP-34. No.10. October 1986
 [6] Leila H.Puska and Ismo V. Lindell "Plane-Wave Propagation in Decomposable Bianiso-

tropic Media " Electronics, 20:43-54, 2000

[7] D.Cheng and Y.M.M.Antar, "Scattering from a perfect electric conductor (pec)cylinder with an inhomogeneous coating thickness of reciprocal uniaxial bianisotropic medium" Electromagnetics Waves and Applications, Vol.12,1431-1445, 1998.
 [8] Majeed A.Al-Kanhal and Ercument Arvas, "Electromagnetic scattering from a chiral cylinder of arbitrary cross section", IEEE.AP, vol.44, No.7, 1041-1048, July 1996.
 [9] Atsushi Kusunoki "Analysis of electromagnrtic scattering by a chiral coated dielectric cylinder using the FDTD method", 1998 Microwave Conference, 975-978, 1998

이 상 목(Sang-Mok Lee)

정회원



1984년 2월 : 한국항공대학교 항공전자공학과 졸업
 1986년 2월 : 한국항공대학교 항공전자공학과 대학원 졸업
 1996년 8월 : 현재 인하대학교 전자공학과 박사과정수료

엄 상 진(Sang-Jin Eom)

학생회원



1996년 2월 : 인하대학교 전자공학과 학사 졸업
 2001년 2월 : 인하대학교 전자공학과 대학원 전자통신 공학 석사 졸업예정

<주관심 분야> 전자장 이론 및 산란

윤 중 한(Joung-Han Yoon)

정회원



1994년 2월 : 인하대학교 전자공학과 학사 졸업
 1996년 8월 : 인하대학교 전자공학과 대학원 전자통신 공학 석사 졸업
 1996년 9월~현재 인하대학교 전자공학과 박사과정 수료

<주관심 분야> 전자장 이론 및 산란, 패치 안테나.