

유전체로 코팅된 도체의 전자파 산란

한상호*, 서정훈**, 안종출***, 정백호****

*호서대학교 벤처전문대학원, **호서대학교 대학원, ***엠에이 전자, ****호서대학교 전기정보통신공학부

Electromagnetic Scattering from Conductors Coated with a Dielectric Material

Sang Ho Han*, Jung Hoon Seo**, Chong Chul An***, Baek Ho Jung****

*Graduate School of Venture, Hoseo University, **Graduate School, Hoseo University

MA Electronics, *Department of Information and Communication Eng., Hoseo University

Abstract - In this paper, we present the analysis of electromagnetic scattering from arbitrarily shaped three-dimensional conducting objects coated with a dielectric material. The integral equation treated here is the combined field integral equation. Numerical results of radar cross section for coated conducting structure are presented and compared with other available solutions.

1. 서 론

유전체로 코팅된 도체 구조로부터 전자파가 산란되는 문제에는 다양한 방법으로 연구가 집중되었으며, 많은 문헌들이 발표되었다. 그렇지만 대부분의 연구에서 그 해석 대상은 단면이 균일한 2차원 구조 또는 3차원 회전체로 제한되었다 [1], [2]. 표면 적분방정식을 사용하여 3차원 문제를 취급하기 위해서는 삼각형 패치 모델이 이용된다. 이 삼각형 패치는 임의 형상의 3차원 구조를 표현하는데 적합하며, 여기에 사용되는 전개함수는 RWG (Rao, Wilton, Glisson) 함수가 사용된다 [3]. 참고문헌 [4]에서는 임의 형상의 3차원 코팅 구조를 해석하기 위하여 도체 표면에는 전장 적분방정식 (electric field integral equation, EFIE)을, 그리고 유전체 표면에는 PMCHW (Poggio, Miller, Chang, Harrington, Wu) 적분방정식을 적용한 바가 있으며, 여기서 모멘트법의 적용 시 전류의 전개함수 및 시험함수로서 RWG 함수를 사용한 바가 있다.

산란체의 해석시 EFIE 또는 자장 적분방정식 (magnetic field integral equation, MFIE)만을 사용할 경우 구조물의 내부 공진주파수에서는 그 해가 발산한다. 이 내부공진 문제를 제거하기 위한 방법이 EFIE와 MFIE를 조합한 결합 적분방정식 (combined field integral equation, CFIE)이다. 3차원 코팅 구조의 산란 해석에 여러가지 적분식이 사용된 바가 있지만, 지금까지 3차원 임의 형상 구조물의 표현에 적합한 삼각형 패치 모델을 이용하여 CFIE가 적용된 연구는 없었다. 본 논문에서는 CFIE를 적용하여 유전체의 산란을 해석하는 참고문헌 [5]에 근거하여 코팅 구조의 복합 매질에 대해서도 내부공진 문제가 없이 안정된 산란해를 얻을 수 있는 CFIE의 해법을 제안하고자 한다.

2. 적분방정식

본 장에서는 표면 적분방정식을 이용하여 코팅된 3차원 복합구조를 해석할 수 있는 몇 가지 방법을 살펴보고자 한다. 공식화의 간단함을 위하여 해석의 대상이 되는 코

팅 구조를 단일 완전 전기도체 (perfectly electric conductor, PEC)가 균일한 유전체로 둘러 쌓여진 구조로 가정한다. 코팅 구조에는 외부로부터 평면파가 입사한다고 가정하고, 이 평면파의 전장과 자장은 E^i 및 H^i 로 표기된다. 도체를 감싸고 있는 유전체 표면 S_d 의 외부와 내부 영역은 매질 상수 (ϵ_1, μ_1) 및 (ϵ_2, μ_2) 로 각각 구분된다. 등가원리에 의하여 도체 표면 S_c 는 전기전류 J_c 로, 유전체 표면은 전기전류 J_d 및 자기전류 M_d 로 대체된다. 그리고 유전체 표면에서 전장장의 접선성분이 연속인 조건과 도체 표면에서 전체 전장의 접선성분이 0인 경계조건을 적용하면 적분방정식을 다음과 같이 얻을 수 있다 [4].

$$[-E_{1d}^s(J_d, M_d)]_{\tan} = [E^i]_{\tan}, \quad r \in S_d \quad (1)$$

$$[E_{2d}^s(J_c) - E_{2d}^s(J_d, M_d)]_{\tan} = 0, \quad r \in S_d \quad (2)$$

$$[E_{2c}^s(J_c) - E_{2c}^s(J_d, M_d)]_{\tan} = 0, \quad r \in S_c \quad (3)$$

여기서 윗첨자 's'는 산란장을, 아래첨자는 등가원리에 의하여 장이 계산되는 매질의 영역을 나타낸다. 그리고 첨자 'tan'은 장의 접선성분임을 의미한다. 상기의 적분식 (1)-(3)은 전장의 경계조건만을 고려하였으므로 전장 적분방정식이 된다. 그리고 유전체 및 도체의 표면에서 모두 전장만을 고려한 이유로 인하여 본 논문에서는 이 전장적분식을 EFIE-EFIE라 부른다. 이와 유사한 과정으로 유전체 및 도체 표면에서 자장의 경계조건을 적용한 적분방정식은 다음과 같다.

$$[-H_{1d}^s(J_d, M_d)]_{\tan} = [H^i]_{\tan}, \quad r \in S_d \quad (4)$$

$$[H_{2d}^s(J_c) - H_{2d}^s(J_d, M_d)]_{\tan} = 0, \quad r \in S_d \quad (5)$$

$$J_c - \hat{n} \times [H_{2c}^s(J_c) - H_{2c}^s(J_d, M_d)]_{\tan} = 0, \quad r \in S_c \quad (6)$$

여기서도 유전체 및 도체 표면에 모두 자장의 경계조건만을 적용하였으므로 식 (4)-(6)을 MFIE-MFIE라고 부른다. 식 (6)에서 \hat{n} 은 표면의 외향 법선 단위 벡터이다.

식 (1)-(6)을 이용하여 다음과 같이 CFIE를 구성할 수 있다.

$$(1 - a_d)[-E_{1d}^s(J_d, M_d)]_{\tan} + a_d \eta_1 [-H_{1d}^s(J_d, M_d)]_{\tan}$$

$$= (1 - \alpha_d)[E^i]_{\tan} + \alpha_d \eta_1 [H^i]_{\tan}, \quad r \in S_d \quad (7)$$

$$(1 - \alpha_d)[E_{2d}^s(I_c) - E_{2d}^s(I_d, M_d)]_{\tan} + \alpha_d \eta_2 [H_{2d}^s(I_c) - H_{2d}^s(I_d, M_d)]_{\tan} = 0, \quad r \in S_d \quad (8)$$

$$(1 - \alpha_c)[E_{2c}^s(I_c) - E_{2c}^s(I_d, M_d)]_{\tan} + \alpha_c \eta_2 [I_c - \hat{n} \times (H_{2c}^s(I_c) - H_{2c}^s(I_d, M_d))]_{\tan} = 0, \quad r \in S_c \quad (9)$$

여기서 η_1 과 η_2 는 영역 1과 2의 파동 임피던스이며, α_c 와 α_d 는 CFIE에서 일반적으로 사용되는 결합계수로 0과 1 사이의 실수이다. 도체 및 유전체 표면에 전장과 자장의 연속 조건을 모두 적용하였으므로 상기의 적분식을 본 논문에서는 CFIE-CFIE라고 부른다. 또 다른 결합적분식을 구성하는 방법으로서 도체 표면에는 식 (9)와 동일하게 CFIE를 사용하고, 유전체 표면에는 PMCHW 적분식을 적용하면 CFIE-PMCHW를 얻을 수 있다. 즉 식 (1)과 (2)를, 그리고 식 (4)와 (5)를 각각 합하면 유전체 표면에 관한 적분식은 다음과 같다.

$$[-E_{1d}^s(I_d, M_d) - E_{2d}^s(I_d, M_d) + E_{2d}^s(I_c)]_{\tan} = [E^i]_{\tan}, \quad r \in S_d \quad (10)$$

$$[-H_{1d}^s(I_d, M_d) - H_{2d}^s(I_d, M_d) + H_{2d}^s(I_c)]_{\tan} = [H^i]_{\tan}, \quad r \in S_d \quad (11)$$

참고문헌 [1]에서 식 (9)의 $\alpha_c=0$ 이면 E-PMCHW, 그리고 $\alpha_c=1$ 이면 H-PMCHW로 명명된 바가 있다.

지금까지 기술된 적분식을 모멘트법으로 풀기 위하여 해석 구조의 표면을 삼각형 패치로 모델링하며, 참고 문헌 [3]에서 제안된 RWG 함수를 전개함수로 이용한다. EFIE의 적용시 유전체 표면의 자기전류의 근사에는 또 다른 벡터 함수가 필요하며, 이 함수는 $g_n = \hat{n} \times f_n$ 과 같이 정의된다. 여기서 \hat{n} 은 삼각형 표면의 외향 법선 단위 벡터이다. 이 두 개의 함수를 이용하여 EFIE-EFIE의 적용시 전기전류 I_c 와 I_d , 그리고 자기전류 M_d 는 다음과 같이 전개된다.

$$I_c(x) = \sum_{n=1}^{N_c} I_n f_n(x) \quad (12)$$

$$I_d(x) = \sum_{n=1}^{N_d} J_n f_n(x) \quad (13)$$

$$M_d(x) = \sum_{n=1}^{N_d} M_n g_n(x) \quad (14)$$

여기서 N_c 와 N_d 는 각각 도체 및 유전체의 삼각형 패치 모델에서 두 개의 삼각형이 접하는 공유변의 개수이다. 모멘트법의 적용시 다음 과정으로 적합한 시험함수를 이용하여 적분식의 내적을 취한다. 시험함수로 RWG 함수를 선택하여 식 (1)-(3)을 f_m 으로 내적을 취하면 그 결과를 다음과 같이 적을 수 있다.

$$\langle f_m, -E_{1d}^s(I_d(f_n), M_d(g_n)) \rangle = \langle f_m, E^i \rangle \quad (15)$$

$$\langle f_m, E_{2d}^s(I_c(f_n)) - E_{2d}^s(I_d(f_n), M_d(g_n)) \rangle = 0 \quad (16)$$

$$\langle f_m, E_{2c}^s(I_c(f_n)) - E_{2c}^s(I_d(f_n), M_d(g_n)) \rangle = 0 \quad (17)$$

MFIE-MFIE의 적용시는 도체 표면의 전기전류 I_c 는 식 (12)와 동일하게 근사되지만, 유전체 표면의 등가 전기전류 I_d 및 자기전류 M_d 는 다음과 같이 전개된다.

$$I_d(x) = \sum_{n=1}^{N_d} J_n g_n(x) \quad (18)$$

$$M_d(x) = \sum_{n=1}^{N_d} M_n f_n(x) \quad (19)$$

이 전류의 전개 방법은 EFIE-EFIE의 식 (13)과 (14)와 는 쌍대이다. RWG 함수 f_m 을 시험함수로 사용하여 식 (4)-(6)에 내적을 취하면 그 결과를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\langle f_m, -H_{1d}^s(I_d(g_n), M_d(f_n)) \rangle = \langle f_m, H^i \rangle \quad (20)$$

$$\langle f_m, H_{2d}^s(I_c(f_n)) - H_{2d}^s(I_d(g_n), M_d(f_n)) \rangle = 0 \quad (21)$$

$$\langle f_m, I_c(f_n) - \hat{n} \times [H_{2c}^s(I_c(f_n)) - H_{2c}^s(I_d(g_n), M_d(f_n))] \rangle = 0 \quad (22)$$

이제는 CFIE-CFIE에 모멘트법을 적용하는 과정을 기술하고자 한다. 모든 전기전류와 자기전류는 각각 식 (12)와 (13), 그리고 (19)처럼 RWG 함수로 근사된다. 그리고 시험함수는 식 (7)과 (8)에 대해서는 f_m 과 g_m 을 동시에, 식 (9)에 대하여 f_m 을 사용한다. 즉 참고문헌 [5]에서 적용된 바와 같이 유전체 표면에 관한 적분식에서 전장으로 구성되는 항에 대해서는 $f_m + g_m$ 을, 그리고 자장으로 구성되는 적분식의 항에 대해서는 $-f_m + g_m$ 으로 시험 내적을 취하면, 그 표현은 다음과 같다.

$$(1 - \alpha_d) \langle f_m + g_m, -E_{1d}^s(I_d(f_n), M_d(f_n)) \rangle + \alpha_d \eta_1 \langle -f_m + g_m, -H_{1d}^s(I_d(f_n), M_d(f_n)) \rangle = (1 - \alpha_d) \langle f_m + g_m, E^i \rangle + \alpha_d \eta_1 \langle -f_m + g_m, H^i \rangle \quad (23)$$

$$(1 - \alpha_c) \langle f_m + g_m, E_{2d}^s(I_c(f_n)) - E_{2d}^s(I_d(f_n), M_d(f_n)) \rangle + \alpha_d \eta_2 \langle -f_m + g_m, H_{2d}^s(I_c(f_n)) - H_{2d}^s(I_d(f_n), M_d(f_n)) \rangle = 0 \quad (24)$$

$$(1 - \alpha_c) \langle f_m, E_{2c}^s(I_c(f_n)) - E_{2c}^s(I_d(f_n), M_d(f_n)) \rangle + \alpha_c \eta_2 \langle f_m, I_c(f_n) - \hat{n} \times [H_{2c}^s(I_c(f_n)) - H_{2c}^s(I_d(f_n), M_d(f_n))] \rangle = 0 \quad (25)$$

시험함수의 또 다른 선택 방법은 참고문헌 [5]에서 제안된 바와 같이 전장에 대하여 $f_m - g_m$ 을, 자장에 대하여 $f_m + g_m$ 을 시험함수로 취할 수도 있다. 또 다른 결합적분방정식인 CFIE-PMCHW의 경우 RWG 함수는 모든 전류의 전개함수로 사용되며, 도체 및 유전체 표면에 관한 적분방정식에 내적을 취할 때 시험함수로도 사용된다. 따라서 시험함수 f_m 으로 식 (10)과 (11)에 내적을 취하면

$$\langle f_m, -E_{1d}^s(I_d(f_n), M_d(f_n)) \rangle$$

$$-E_{2d}^s(I_d(f_n), M_d(f_n)) + E_{2d}^s(I_c(f_n)) \rangle = \langle f_m, E^i \rangle \quad (26)$$

$$\langle f_m, -H_{1d}^i(I_d(f_n), M_d(f_n)) - H_{2d}^s(I_d(f_n), M_d(f_n)) + H_{2d}^s(I_c(f_n)) \rangle = \langle f_m, H^i \rangle \quad (27)$$

으로 표현된다. 그러므로 식 (25), (26), 그리고 (27)을 행렬식으로 변환하여 미지의 전류를 계산할 수 있다. 행렬식의 변환시 각 행렬요소의 계산과정은 참고문헌 [5]에 기술된 방법과 유사하다.

3. 수치 결과

본 장에서는 지금까지 논의된 여러가지 적분방정식으로부터 계산된 레이더 단면적의 수치 결과를 보이고 비교한다. 수치 계산시 산란체에 $-z$ 방향으로 평면파가 조사되며, 이 평면파는 x 방향의 편파를 가진다고 가정한다. RCS는 4 MHz 간격으로 0부터 400 MHz까지 계산된다. 그리고 계산된 모든 결과를 상용 소프트웨어인 WIPL-D를 사용하여 계산한 결과와 비교하며 [6], 이때 계산되는 주파수 간격도 동일하게 두었다.

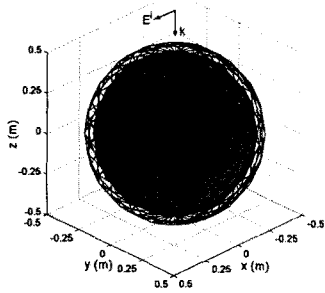


그림 1. 유전체 ($\epsilon_r=2$)로 코팅된 도체구. 도체구의 반경은 0.45 m, 코팅 두께는 0.05 m.

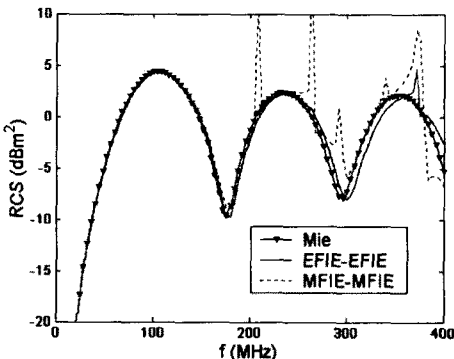


그림 2. EFIE-EFIE 및 MFIE-MFIE로부터 계산된 그림 1 구조의 RCS와 엄밀해의 비교.

그림 1은 해석 구조의 예로서 유전체로 코팅된 도체구이다. 도체구의 반경은 0.45 m이며, 그 중심은 좌표계

의 원점에 있다. 유전체의 코팅 두께는 0.05 m이며 상대 유전율은 $\epsilon_r=2$ 이다. 도체구 및 유전체의 표면은 각각 528 개의 삼각형 패치로 모델링되어, 공유변의 개수는 792가 된다. 따라서 전체 전류계수의 개수는 $N=2,376$ 이다. WIPL-D의 계산시 전체 미정계수의 개수는 2,304로 하였다. 그림 2는 EFIE-EFIE 및 MFIE-MFIE로부터 계산된 그림 1의 RCS이며 엄밀해 (Mie solution)와 함께 보이고 있다. 이 해들은 전장 또는 자장의 경계조건만을 고려한 결과이므로 산란체의 내부 공진주파수에 기인한 해의 불연속이 있음을 볼 수 있다. 또한 수치 해들은 첫 불연속 이전의 저주파 영역에서는 서로 잘 일치하고 있으며, MFIE-MFIE의 해는 EFIE-EFIE의 해보다 더욱 뚜렷한 불연속이 있음도 볼 수 있다.

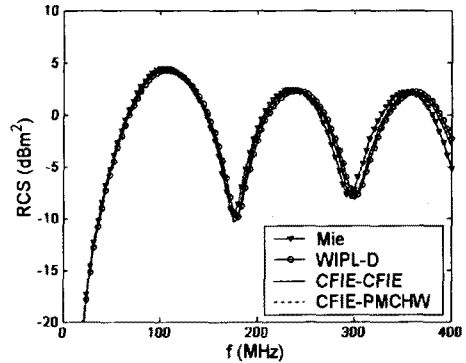


그림 3. CFIE-CFIE와 CFIE-PMCHW로부터 계산된 그림 1 구조의 RCS 및 엄밀해와 WIPL-D 결과의 비교.

그림 3은 $\alpha_c = \alpha_d = 0.5$ 로 둔 CFIE-CFIE 및 $\alpha_c = 0.5$ 로 둔 CFIE-PMCHW로부터 계산된 해를 엄밀해와 WIPL-D의 결과와 함께 보이고 있다. 모든 해는 내부공진 문제 없이 안정되어 있으며, 서로 잘 일치하고 있다.

4. 결론

유전체로 코팅된 임의 형상의 3차원 도체로부터 전자파 산란을 해석하기 위한 적분방정식을 고찰하였으며, 안정된 해를 얻기 위한 결합적분방정식의 해법을 제안하였다. 적분방정식은 등가원리와 매질 경계면에서 전자장의 연속 조건을 이용하여 유도되었으며, 수치해를 얻기 위하여 해석 구조의 표면을 삼각형 패치로 분할하여 모멘트법을 적용하였다. EFIE와 MFIE로부터 계산된 해는 산란 구조물의 내부 공진주파수에서 발산하였으며, 제안된 CFIE-CFIE 및 CFIE-PMCHW의 해는 내부공진 문제 없이 안정되어 있었다. 그리고 이 두 가지 해의 결과를 상용 소프트웨어를 사용하여 계산한 결과와 비교하였으며, 서로 잘 일치하고 있음을 확인하였다.

[참고 문헌]

- [1] A. A. Kishk and L. Shafai, "Different formulations for numerical solution of single or multibodies of revolution with mixed boundary conditions," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 34, no. 5, pp. 666-673, May 1986.
- [2] E. Arvas and T. K. Sarkar, "RCS of two-dimensional structures consisting of both dielectrics and conductors of arbitrary cross

- section," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 37, no. 5, pp. 546-554, May 1989.
- [3] S. M. Rao, D. R. Wilton, and A. W. Glisson, "Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 30, no. 5, pp. 409-418, May 1982.
- [4] S. M. Rao, C. C. Cha, R. L. Cravey, and D. L. Wilkes, "Electromagnetic scattering from arbitrary shaped conducting bodies coated with lossy materials of arbitrary thickness," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 39, no. 5, pp. 627-631, May 1991.
- [5] B. H. Jung, T. K. Sarkar, and Y.-S. Chung, "A survey of various frequency domain integral equations for the analysis of scattering from three-dimensional dielectric objects," *J. of Electromagn. Waves and Applicat.*, vol. 16, no. 10, pp. 1419-1421, 2002.
- [6] B. M. Kolundzija, J. S. Ognjanovic, and T. K. Sarkar, *WIPL-D Electromagnetic Modeling of Composite Metallic and Dielectric Structures, Software and User's Manual*. Norwood, Artech House, 2000.

<이 논문은 2003년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음. KRF-2003-002-D00273>