크기가 작은 구의 전파흡수체의 설계

(Design of a Wave Absorber for a Small Sized Sphere)

°심 재륜, 김 효태

포항공과대학교 전자전기공학과 전파기술연구실
(우) 790-784, 경북 포항시 남구 효자동 산 31번지
E-mail : jrshim@mom.postech.ac.kr, htkim@mom.postech.ac.kr

요 약 문

크기가 작은 구의 전파흡수체의 설계 방법을 제시하였다. 산란현상을 물리적인 관점에서 보면 크기가 작은 구의 역산란파는 반사파뿐만 아니라 회절파에 대한 영향을 함께 고려하여야 한다. 본 방법으로 구한 전파흡수체를 크기가 작은 구에 코팅하였을 경우 기존의 무한 평면으로 가정하여 구한 전파흡수체 보다 우수한 흡수 성능을 보인다.

I. 서 론

비행기와 같은 복잡한 표적물은 표준 구조물인 실린더나 구 혹은 wedge/edge 등의 기하학적인 조합으로 모델링하여 RCS(Radar Cross Section)를 예측할 수 있다. 이러한 표적물의 RCS를 줄이기 위해 표적물의 형상을 변경(shaping)하거나 부분적으로 전파흡수물질(RAM, Radar Absorbing Material)을 코팅한다[1, 2].

GTD/UTD 개념에서 산란현상을 물리적으로 분석하면 산란파는 반사파와 회절파의 합으로 표현된다[3]. 구의 반지름이 큰 경우에는 반사파만으로도 전체 산란파를 어느 정도 예측 가능하지만, 구의 반지름이 작은 경우에는 반사파와 회절파를 함께 고려해 주어야 한다. 즉, 구의 반지름이 큰 경우의 완전흡수조건은 기존의 단층형 전파흡수체의 설계 방법을 응용하여 구를 무한 평면으로 가정하여 반사계수가 0이 되는 조건을 찾아 주는 것이었다[4, 5]. 그러나, 구의 반지름이 작은 경우에는 구의 원주를 타고 흐르는 회절파인 creeping wave 성분으로 인하여 구를 무한 평면으로 가정하여 구한 전파흡수체는 완전흡수조건(perfect absorbing condition)을 만족하지 못한다.

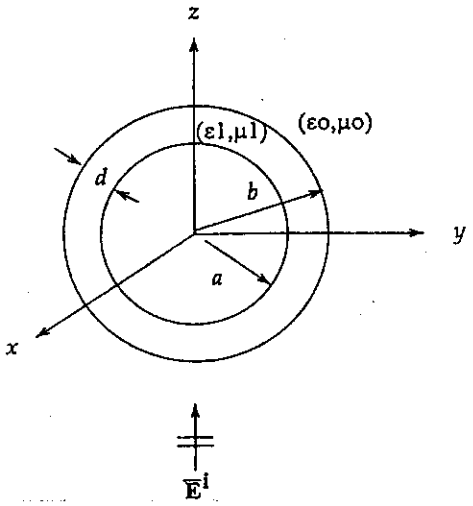


그림 1. 코팅된 구의 구조

본 연구는 도체구에 흡수물질을 코팅하여 RCS를 줄이는 방법에 대한 연구로 특히 크기가 파장에 비해 상대적으로 작은 구의 전파흡수체의 설계에 대한 연구이다. 실린더형의 표적물에 대한 전파흡수체의 설계는 Hashimoto에 의해 연구되었다[6].

II. 분 석

1. 고유함수 해

반지름 a인 도체구에 흡수물질 ε_1과 μ_1이 두께 $d\ (=b-a)$로 코팅되어 있고 입사파의 편향이 $\hat{x}$이고 $+z$ 축으로 진행하는 경우를 그림 1에 나타

내었다. 시간 조화 함수는 $e^{j\omega t}$로 하였고 모든 수식에서 생략하였다.

$$\overline{E}^{i} = \hat{x} E_o e^{-jk_o z} \tag{1}$$

그림 1의 구조에서 $\theta = \pi$에서의 원거리(far zone) 역산란파(backscattered field)는 Mie series의 해로 다음과 같이 표현할 수 있다[7, 8].

$$\overline{E}^{s} \simeq \hat{\theta}(E_\theta^{TE} + E_\theta^{TM}) + \hat{\phi}(E_\phi^{TE} + E_\phi^{TM}) \tag{2}$$

여기서,

$$E_\theta^{TE} = A_o \sum_{n=1}^{\infty} s_n \frac{\hat{f}_n'(k_o b) - \hat{Y}_n \hat{f}_n(k_o b)}{\hat{H}_n^{(2)\prime}(k_o b) - \hat{Y}_n \hat{H}_n^{(2)}(k_o b)} \tag{3}$$

$$E_\theta^{TM} = -A_o \sum_{n=1}^{\infty} s_n \frac{\hat{f}_n'(k_o b) - \hat{Z}_n \hat{f}_n(k_o b)}{\hat{H}_n^{(2)\prime}(k_o b) - \hat{Z}_n \hat{H}_n^{(2)}(k_o b)} \tag{4}$$

$$E_\phi^{TE} = B_o \sum_{n=1}^{\infty} s_n \frac{\hat{f}_n'(k_o b) - \hat{Y}_n \hat{f}_n(k_o b)}{\hat{H}_n^{(2)\prime}(k_o b) - \hat{Y}_n \hat{H}_n^{(2)}(k_o b)} \tag{5}$$

$$E_\phi^{TM} = -B_o \sum_{n=1}^{\infty} s_n \frac{\hat{f}_n'(k_o b) - \hat{Z}_n \hat{f}_n(k_o b)}{\hat{H}_n^{(2)\prime}(k_o b) - \hat{Z}_n \hat{H}_n^{(2)}(k_o b)} \tag{6}$$

$$\hat{Y}_n = \frac{Z_o}{Z_1} \frac{\hat{N}_n(k_1 a)\hat{f}_n'(k_1 b) - \hat{f}_n(k_1 a)\hat{N}_n'(k_1 b)}{\hat{N}_n(k_1 a)\hat{f}_n(k_1 b) - \hat{f}_n(k_1 a)\hat{N}_n(k_1 b)} \tag{7}$$

$$\hat{Z}_n = \frac{Z_1}{Z_o} \frac{\hat{N}_n'(k_1 a)\hat{f}_n'(k_1 b) - \hat{f}_n'(k_1 a)\hat{N}_n'(k_1 b)}{\hat{N}_n'(k_1 a)\hat{f}_n(k_1 b) - \hat{f}_n'(k_1 a)\hat{N}_n(k_1 b)} \tag{8}$$

$$A_o = j E_o \cos\phi \frac{e^{-jk_o r}}{k_o r} \tag{9}$$

$$B_o = j E_o \sin\phi \frac{e^{-jk_o r}}{k_o r} \tag{10}$$

$$s_n = j^{2n}\left(n + \frac{1}{2}\right) \tag{11}$$

위의 식에서 Z_1과 k_1은 코팅물질의 고유 임피이던스와 파수를 나타낸다($Z_1 = \sqrt{\mu_1/\varepsilon_1}$, $k_1 = \sqrt{\varepsilon_1 \mu_1}$). $\hat{f}_n$, $\hat{N}_n$, $\hat{H}_n^{(2)}$은 alternative spherical Bessel 함수이다 [9, 10].

고유함수 해로 코팅된 구의 산란파를 계산하기 위해서는 무한급수 해의 수렴성에 대한 사전조사가 필요하다. 그림 2는 반지름 a가 3 cm이고 코팅두께가 5.55 mm 이고 흡수 물질이 $\varepsilon_r = (2., -j0.5)$, $\mu_r = (0.631, -j0.529)$인 조건에서의 고유함수 해의 수렴성에 관한 결과이다. 주파수 10 GHz에서는 도체구의 반지름이 $1\lambda_o$이고 코팅두께는 $0.185\lambda_o$로 본 연구의 관심이 되는 크기가 작은 구에 해당된다.

그림 2는 정규화된 RCS(normalized RCS)를 계산하기 위해 고려된 모드의 개수에 따른 수렴 정도를 보여준다. 그림 2에 관한 코팅조건에서는 12 정도의 모드만으로도 충분히 해의 정확성을 보장 받을 수 있다.

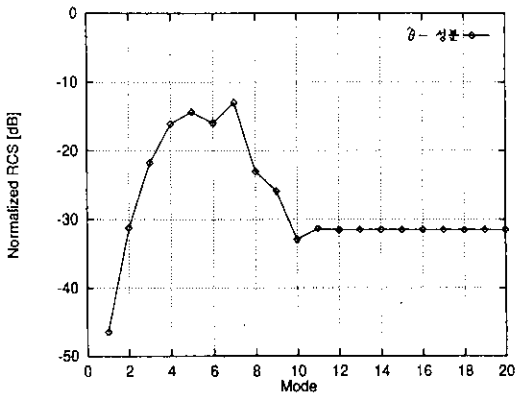


그림 2. 고유함수 해의 수렴성

2. 구의 반지름을 고려한 전파흡수체의 설계

본 연구에서는 구의 고유함수 해를 직접 이용하여 역산란파가 0이 되는 조건을 수치 해석적으로 찾았다. 식 (2)의 $\hat{\theta}$ 성분에 대한 역산란파는 TE 성분과 TM 성분의 합으로 구성되어 TE 성분과 TM 성분이 서로 상쇄되는 흡수 물질을 찾아주면 구의 반지름이 고려된 전파흡수체를 설계하게 된다.

$$E_\theta^{TE} = -E_\theta^{TM} \tag{12}$$

즉,

$$\text{Real}\,(E_\theta^{TE}) = -\,\text{Real}\,(E_\theta^{TM}) \tag{13}$$

$$\text{Imag}\,(E_\theta^{TE}) = -\,\text{Imag}\,(E_\theta^{TM}) \tag{14}$$

식 (12)는 E_θ^{TE}와 $-E_\theta^{TM}$의 실수부와 허수부가 같아야 하는 식 (13)과 식 (14)의 두 개의 조건을 뜻한다. 코팅된 구의 완전흡수조건은 도체구의 반

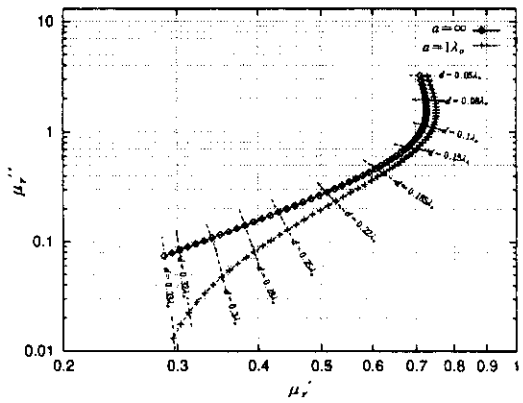
지름 a,흡수물질 $\varepsilon_r(=\varepsilon_r'-j\varepsilon_r'')$, $\mu_r(=\mu_r'-j\mu_r'')$과 코팅두께 d 등 여섯 개 변수 $(a, \varepsilon_r', \varepsilon_r'', \mu_r', \mu_r'', d)$의 함수이다. 따라서 전파흡수체를 설계하기 위하여 네 가지 $(a, \varepsilon_r', \varepsilon_r'', d)$의 조건을 사전에 가정한 후 나머지 두 가지 (μ_r', μ_r'')를 수치 해석적으로 찾았다. 나머지 두 개의 근은 Newton-Raphson 수치 해석 방법을 이용하였다[11]. $\hat{\phi}$ 성분에 대한 전파흡수체의 설계도 $\hat{\theta}$ 성분에 대한 과정과 같다.

$$E_\phi^{TE} = -E_\phi^{TM} \tag{15}$$

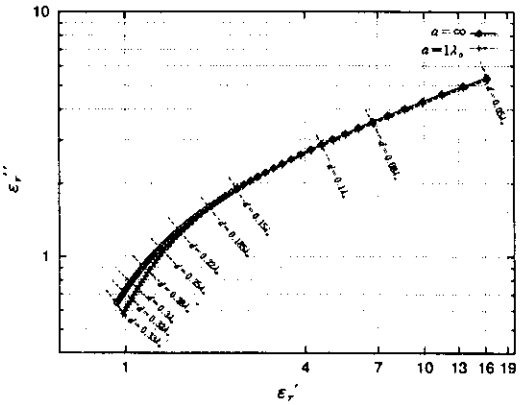
III. 수치 결과

그림 3의 가)는 구의 반지름이 $1\lambda_o$이고 $\varepsilon_r=(2.,-j0.5)$로 주어졌을 때 코팅두께 d를 변화시켜 가면서 $\mu_r\ (=\mu_r'-j\mu_r'')$를 구한 결과로 가로축이 실수부 (μ_r')이고 세로축이 허수부 (μ_r'')이다. 코팅두께 d는 $0.05\lambda_o$에서 $0.33\lambda_o$까지 $0.005\lambda_o$씩 증가시켰다. 실선은 무한 평면 $(a=\infty)$으로 가정하고 구한 결과이고 점선은 본 연구에서 제안한 방법을 이용하여 구의 반지름 $1\lambda_o$ $(a=1\lambda_o)$를 고려한 결과이다. 그림 3의 나)는 구의 반지름이 $1\lambda_o$이고 $\mu_r=(1.6,-j0.1)$로 주어졌을 때 코팅두께 d를 변화시켜 가면서 ε_r $(=\varepsilon_r'-j\varepsilon_r'')$를 구한 결과로 실선은 무한 평면 $(a=\infty)$으로 가정하고 구한 결과이고 점선은 구의 반지름을 $1\lambda_o$ $(a=1\lambda_o)$를 고려한 결과이다. 그림 3에서 보듯이 무한 평면으로 가정하여 구한 전파흡수물질과 구의 반지름을 고려한 전파흡수물질 μ_r과 ε_r의 전체적인 궤적의 변화에는 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 또한 구의 반지름을 차츰 증가시키면 무한평면으로 가정하여 구한 전파흡수물질의 궤적으로 접근함을 유추할 수 있다.

표 1에 그림 3의 $d=0.185\lambda_o$에서와 $d=0.3\lambda_o$에서의 완전흡수조건에 대해 정리하였다. 그림 4는 표 1에 정리된 4가지 조건의 전파흡수체로 코팅했을 때의 X-band (8 GHz ~ 12 GHz)에서의 RCS 계산 결과이다.



가) ε_r이 주어졌을 때의 μ_r



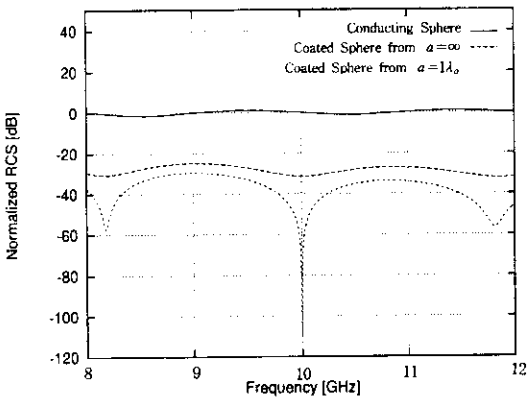
나) μ_r이 주어졌을 때의 ε_r

그림 3. 계산된 전파흡수물질

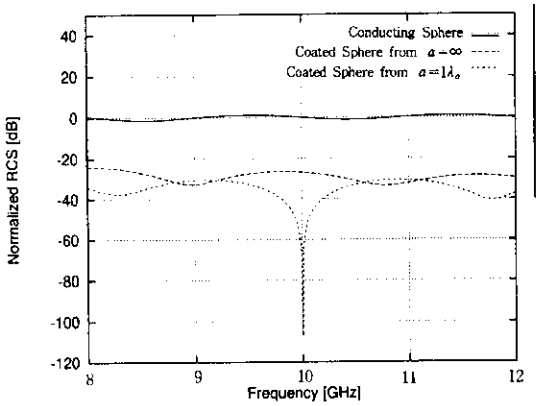
표 1. 그림 3에서 구한 전파흡수물질

조건	Parameter 값		비고
1	$a=\infty$, $d=0.185\lambda_o$	ε_r = (2.,-j0.5)	가)의 결과
		μ_r = (0.631,-j0.529)	
2	$a=1\lambda_o$, $d=0.185\lambda_o$	ε_r = (2.,-j0.5)	
		μ_r = (0.649,-j0.494)	
3	$a=\infty$, $d=0.3\lambda_o$	ε_r = (1.031,-j0.767)	나)의 결과
		μ_r = (1.,6,-j0.1)	
4	$a=1\lambda_o$, $d=0.3\lambda_o$	ε_r = (1.067,-j0.693)	
		μ_r = (1.,6,-j0.1)	

그림 4의 실선은 반지름이 $3cm$ ($a=1\lambda_o$)인 도체 구의 RCS이다. 그림 4의 가)에서 주파수 10 GHz에서 완전흡수조건이 일어나는 것은 "조건 2"에 해당하는 코팅조건으로 구의 반지름이 고려된 전파흡수체를 코팅하였을 때의 결과이다. 그림 4의 나)에서 주파수 10 GHz에서 완전흡수조건이 일어나는 것은 "조건 4"에 해당하는 코팅조건의 결과이다.



가) ε_r이 주어졌을 때의 μ_r



나) μ_r이 주어졌을 때의 ε_r

그림 4. X-band에서의 정규화된 RCS

IV. 결 론

반지름이 작은 구의 전파흡수체의 설계 방법을 제시하였다. 크기가 작은 구에서는 회절파의 영향 때문에 구를 무한 평면으로 가정하여 반사파만을 0으로 하는 기존의 설계 방법에 의한 전파흡수체는 완전흡수조건을 만족하지 못한다. 본 연구에서는 반사파와 creeping wave가 포함된 코팅된 구의 고유함수 해를 직접 이용하여 구의 반지름이 고려된 전파흡수체를 설계하였다. 본 연구에서 제안한 구의 반지름을 고려한 전파흡수체의 설계 방법을 반지름이 큰 구에도 쉽게 적용할 수 있다. 본 방법으로 구한 전파흡수체를 크기가 작은 구에 코팅하였을 경우 기존의 무한 평면으로 가정하여 구한 전파흡수체 보다 우수한 흡수 성능을 보인다.

참고문헌

[1] A. K. Bhattacharyya and D. L. Sengupta, *Radar Cross Section Analysis and Control*, Artech House, 1991

[2] E. F. Knott, J. F. Shaeffer and M. T. Tuley, *Radar Cross Section*, Artech House, 1993

[3] D. A. McNamara, C. W. Pistorius and J. A. G. Malherbe, *Introduction of the Uniform Geometrical Theory of Diffraction*, Artech House, 1990

[4] H. M. Musal and H. T. Hahn, "Thin-Layer Electromagnetic Absorber Design," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol.-25, no. 5, pp.3851-3853, Sep. 1989

[5] J. J. Pesque, D. P. Bouche and R. Mittra, "Optimization of Multilayer Antireflection Coatings Using an Optimal Control Method," *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, vol. MTT-40, no. 9, pp.1789-1796, Sep. 1992

[6] O. Hashimoto and O. Mizokami, "A Method for Designing Wave Absorber for Cylindrical Objects," *IEEE Trans. on Antenna and Propagation*, vol. AP-39, no. 6, pp.854-857, June 1991

[7] J. H. Richmond, "Scattering by a Ferrite-Coated Conducting Sphere," *IEEE Trans. on Antenna and Propagation*, vol. AP-35, no. 1, pp.73-79, Jan. 1987

[8] H. T. Kim, "High-Frequency Analysis of EM Scattering from a Conducting Sphere Coated with a Composite Material," *IEEE Trans. on Antenna and Propagation*, vol. AP-41, no. 12, pp.1665-1674, Nov. 1993

[9] R. F. Harrington, *Time Harmonic Electromagnetic Fields*, McGraw-Hill, 1961

[10] M. Abramowitz and I. Stugun, eds., *Handbook of Mathematical Functions*, Dover, 1965

[11] R. L. Burden and J. D. Faires, Numerical Analysis, PWS-KENT Publishing Company, 1989