

전파흡수능 최적화 설계

An Optimal Design of Microwave Absorbing Material

서 일 성*

Il Sung Seo

송 정 근*

Jung Kun Song

Abstract

A research for the optimal design of microwave absorbing material featuring for the broadband has been conducted to apply to warship. A multilayered structure was suggested using wave absorbing layers and resistance layer to perform high performance in broadband frequencies. For the optimization of the wave absorbing characteristics, the thickness and permittivities of the absorbing layers as well as the surface resistance of the resistant layer were determined using genetic algorithm. The data base of permittivities related to the density of the dielectric materials and loss materials was obtained by the experiments for the dielectric constants of the absorbing layers, furthermore, the results were numerically expressed and used for the optimization.

Keywords : Optimal Design(최적설계), Wave Absorbing Characteristics(전파흡수특성), Broadband(광대역)

1. 서론

무기체계의 레이더 반사파를 줄여 아군의 생존 증대를 향상시키는 스텔스 기술의 중요성이 점차 강조되고 있다. 그러나 과거 전자파 흡수재료는 협대역에서만 전파흡수능을 갖거나 혹은 광대역의 흡수대역을 갖더라도 흡수능이 최적화 되지 않았기 때문에 실용적인 재료는 아니었다. 따라서 무기체계에 적용성을 높이기 위하여 가볍고 얇은 광대역 전자파 흡수재의 설계 및 제작의 중요성은 더욱 커지고 있으며, 이는 스텔스 재료 기술의 핵심요소 중의 하나로 여겨지고 있다. 경량 광대역 전파흡수재료는 전자파 흡수능, 저항막, 전도성막

등으로 이루어진 복합 평판형 재료로서 광대역의 주파수 대역에 대하여 우수한 전파흡수능을 가지며 중량이 가벼운 점이 특징이다. 이런 특성들로 인해 경량 광대역 전파흡수재료는 위협 레이더의 주파수 대역이 여러 가지일 경우, 탐지 및 추적을 회피하기 적합한 재료이며, 적용 무기 체계의 중량증가를 최소화 시킬 수 있어 중량측면에서 유리한 재료로 기대되고 있다. 본 논문에서는 광대역에서의 전파흡수능 특성을 갖는 전파흡수재료의 흡수능 해석, 최적화 설계 내용을 다루었다.

2. 본론

가. 전파흡수재료의 전파흡수능 해석을 위한 기본이론

1) 손실 유전체에서의 평면 전자기파

평면전자기파는 어느 한 순간에 파의 진행방향에

† 2010년 7월 1일 접수~2010년 9월 10일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

책임저자 : 서일성(rioma@naver.com)

수직인 평면상에서 그 전자파의 진폭과 위상이 동일한 파를 의미한다. 손실 유전체에 전자기장의 세기 E가 제공되면 전류 $J = \sigma E$ 가 흐르게 된다. time-harmonic field(자유공간에서의 전자기파는 시간에 대하여 정현파로 진행됨)에서의 손실 유전체에 대하여 맥스웰 방정식 식을 정리하면 식 (1)과 같다.

$$\nabla \times H_s = (\sigma + j\omega\epsilon)E_s = j\omega\left(\epsilon + \frac{\sigma}{j\omega}\right)E_s = j\omega\epsilon_c E_s \quad (1)$$

여기서 ϵ_c 는 손실 유전체의 복소 유전율이라 부르며 이는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_c = \epsilon + \frac{\sigma}{j\omega} = \epsilon - j\frac{\sigma}{\omega} \quad (2)$$

유전체의 경우 시변 전기장에 의해서 유전체 내부의 (+)전하와 (-)전하의 미소 변위가 발생하게 되며, 이에 따라 분극 현상이 생기게 된다. 시변 전기장의 주파수가 증가하게 되면 유전체 내부의 전하가 시변 전기장의 변화를 따라가지 못하는 out of phase polarization 현상이 생기게 되며, 이때 frictional damping에 의한 에너지 손실이 발생하게 된다. 이러한 frictional damping에 의한 에너지 손실을 도전 손실과 함께 복소 유전율의 허수부로 나타내며, frictional damping 손실과 도전손실을 함께 포함한 복소 유전율은 식 (3)과 같다.

$$\epsilon_c = \epsilon' - j\epsilon'' = \epsilon' (1 - \tan\delta) \quad (3)$$

이때 복소 유전율의 실수부에 대한 허수부의 비를 손실계수라 한다. 식 (3)을 이용하여 전파상수는 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$\gamma = j\omega\sqrt{\mu\epsilon}\left(1 + \frac{\sigma}{j\omega\epsilon}\right)^{\frac{1}{2}} = j\omega\sqrt{\mu\epsilon_c} \quad (4)$$

평면 전자기파가 +z 방향으로 진행한다면 Helmholtz의 파동방정식과 그 해는 각각 식 (5)와 식 (6)과 같으며

$$\frac{d^2 E_x}{dz^2} = \gamma^2 E_x \quad (5)$$

$$E_x = E_0 e^{-\gamma z} = E_0 e^{-\alpha z} e^{-j\beta z} \quad (6)$$

위의 식을 time harmonic field의 맥스웰 방정식에 적용시켜 자기장의 벡터 페이지 H_y 를 정리하고 전파상수를 적용하면 식 (7)과 식 (8)로 나타낼 수 있다.

$$H_y = \frac{\gamma E_0 e^{-\gamma z}}{j\omega\mu} = \frac{\gamma}{j\omega\mu} E_x \quad (7)$$

$$H_y = \frac{j\omega\sqrt{\mu\epsilon_c}}{j\omega\mu} E_x = \sqrt{\frac{\epsilon_c}{\mu}} E_x \quad (8)$$

여기서 전기장의 세기 E_x 와 자기장의 세기 H_y 의 비를 그 매질의 고유 임피던스 η 라고 정의하며, 이를 적용하면 자기장의 벡터 페이지 H_y 는 다음과 같다.

$$H_y = \frac{1}{\eta} E_x \quad (9)$$

2) 수직 입사 평면 전자기파의 반사와 투과

전자기적 물성이 다른 두 매질의 경계면에서 평면 전자기파가 입사하면 Fig. 1에서 보는바와 같이 경계면에서 전자기파는 매질 2의 투과파와 매질 1의 반사파로 나누어진다. 전자기파가 경계면에 대해서 수직으로 입사할 경우 전기장과 자기장 벡터는 경계면에 대하여 평행하게 되며 경계조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{E}_i + \hat{E}_r &= \hat{E}_t \\ \hat{H}_i + \hat{H}_r &= \hat{H}_t \end{aligned}$$

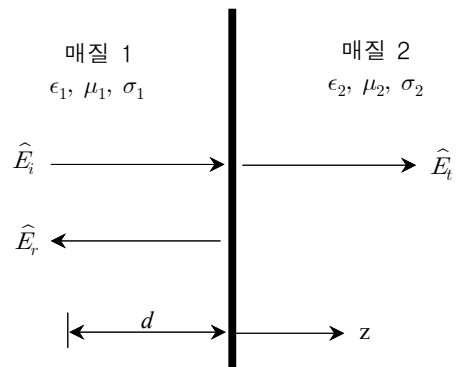


Fig. 1. 두 매질의 경계면에서의 반사 및 투과전자기파

Fig. 1에서 보면 매질 1에는 입사파와 반사파가 공존하며 입사파와 반사파의 합성 전자기장이 위치에 따라 변하게 된다. 이때 입사되는 전자기파 쪽에서 바라 본 재료의 임피던스를 고유 임피던스라 부르며 평면 전자기파가 수직 입사하는 경우에 Fig. 1의 매질 1과 2의 경계면에서 거리 d 만큼 떨어진 곳의 고유 임피던스를 구해보면 식 (10)과 같다.

$$\eta_{im} = \eta_1 \frac{\eta_2 + \eta_1 \tanh(\gamma_1 d)}{\eta_1 + \eta_2 \tanh(\gamma_1 d)} \quad (10)$$

자유공간측정법을 이용한 재료의 유전을 측정의 경우 전도성 금속평판을 후면에 접촉한 시편에 수직으로 입사하는 평면 전자기파의 반사계수를 자유공간에서 측정하며, 이 경우는 매질 1,2,3(공기층, 흡수층, 전도성 금속평판)로 이루어져 있다. 여기서 공기층과 흡수층의 경계면에서의 고유임피던스는 식 (11)과 같다.

$$\eta_{im} = \eta_2 \frac{\eta_3 + \eta_2 \tanh(\gamma_2 d)}{\eta_2 + \eta_3 \tanh(\gamma_2 d)} \quad (11)$$

d 는 흡수층의 두께이며 알루미늄 박판을 완전 도체로 보면 $\eta_3=0$ 로 고유 임피던스 정리하면 식12와 같이 나타난다.

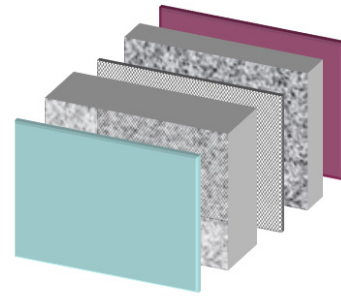
$$\eta_{im} = \eta_2 \tanh(\gamma_2 d) \quad (12)$$

따라서 매질 1과 2의 경계면에서 본 매질 2와 매질 3의 effective intrinsic impedance는 위와 같으며, 매질 1과 2의 경계면에서의 반사계수인 식 (13)은 다음과 같다.

$$\rho = \frac{\eta_2 \tanh(\gamma_2 d) - \eta_1}{\eta_2 \tanh(\gamma_2 d) + \eta_1} \quad (13)$$

나. 전파흡수능 최적화 문제 정립

두께에 비하여 우수한 전파 흡수능과 광대역 전파 흡수 대역을 갖는 전파흡수재의 설계를 위하여 본 시험에서는 Jaumann 흡수체의 spacer 재료로 적절한 유전율을 갖는 재료를 적용하였다. 전파흡수재료의 구조는 다음과 같으며, 두 흡수층의 유전율과 두께, 저항막의 표면저항등 7개의 설계변수를 선정하여 최적화 설계를 수행하였다.



PU Skin
Absorbing Layer 1
Resistive Sheet
Absorbing Layer 2
Conductive Sheet

Fig. 2. 전파흡수재료 구성도

설계변수 범위는 실제로 제작이 가능한 범위를 고려하였으며, 설계변수별 설계범위는 다음과 같다.

- 1.0 ≤ 흡수층 1의 유전율(ϵ') ≤ 5.0
- 0.01 ≤ 흡수층 1의 유전율(ϵ'') ≤ 3.0
- 1.0 ≤ 흡수층 1의 두께 ≤ 4.0
- 100 ohm/□ ≤ 저항막의 표면저항 ≤ 400 ohm/□
- 1.0 ≤ 흡수층 2의 유전율(ϵ') ≤ 5.0
- 0.01 ≤ 흡수층 2의 유전율(ϵ'') ≤ 3.0
- 1.0 ≤ 흡수층 2의 두께 ≤ 4.0

최적화 문제의 목적함수 선정을 위하여 전파흡수재료의 두께와 전파흡수능 그리고 -20dB 흡수능 대역폭을 함께 고려하였다.

$$\text{목적함수} = \sum_i S_{1i}$$

i : -20dB 이하 reflection loss 주파수

최적화 설계 알고리즘의 경우 구조설계 또는 동력학 설계 등에 많이 이용되어온 gradient projection method 또는 linear and quadratic programming 등을 이용할 수 있으나^[1,2] global minimum을 구하기 어려운 문제점이 있어 전파흡수능 최적화 문제에는 적합하지 않다고 판단하였으며, 현재 전파흡수능 최적화 문제에 많이 적용하고 있으며 global minimum을 구하기에 적합한 유전 알고리즘을 이용하였다^[3~5]. 유전알고리즘(이하 GA)이란 자연선택의 법칙을 컴퓨터의 논리로 모방한 것으로 최적화 문제나 탐색 문제에 적용시켜

해를 구하는 알고리즘이다. GA의 처리과정은 아래 그림과 같다. 맨 먼저 주어진 문제에 대하여 어떤 유전자형을 이용할 것인지 결정하는데 주로 2진법으로 이루어진 binary coding을 사용한다. 유전자형을 결정 한 후에는 초기 유전자 집단을 생성하여 1세대를 이루게 되며 후에 선택(도태와 증식), 교배, 돌연변이 등의 진화과정을 통하여 문제를 해결한다. GA의 처리에 필요한 구성요소는 크게 4가지로 첫째는 유전자형을 결정하는 개체 표현방법이며 둘째는 최적화를 위한 진화과정에서 개체의 우열 판정을 위한 적합도 함수이다. 셋째는 각 집단이 세대를 거듭할수록 진화하는 과정을 나타내는 유전 연산자이며, 이는 GA의 연산과정에 영향을 주는 제어 파라미터이다. Fig. 3은 GA처리 단계에 따른 특성 및 GA의 흐름도이다.

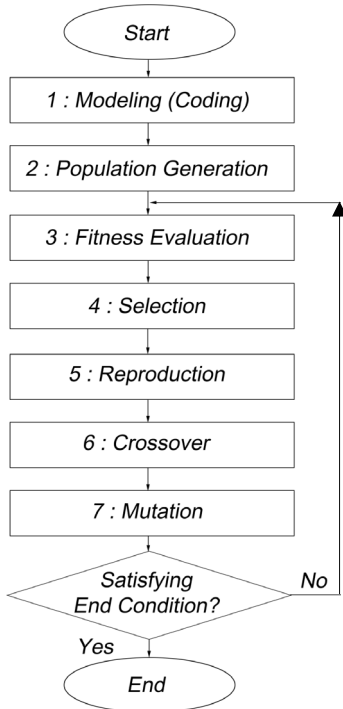


Fig. 3. GA의 흐름도

다. 흡수층 유전율 DB

전파흡수재료 흡수능 최적화를 위하여 전파흡수재료 흡수층의 유전율 DB를 구축하였으며, 설계변수의 범위를 최대화하기 위하여 유전재료(손실율이 낮으며 안정성이 높은 재료로 선정) 및 손실재료(밀도가 낮고 손실율이 높은 재료를 선정) 두가지 재료를 사용하였

다. 측정된 유전재료와 손실재료의 유전율 DB 자료를 최적화 설계 프로그램에 이용하기 위하여 curve fitting 프로그램으로 데이터를 수식화 하였다. 전파흡수재료 제작에 사용된 흡수층의 유전재료와 손실재료의 밀도에 대하여 유전율을 측정결과를 curve fitting 시키고 이를 근사식으로 표현하면 아래와 같다.

* 유전재료

$$\epsilon' = 0.994 + 0.038 \times density$$

$$\epsilon'' = 0.02 (const.)$$

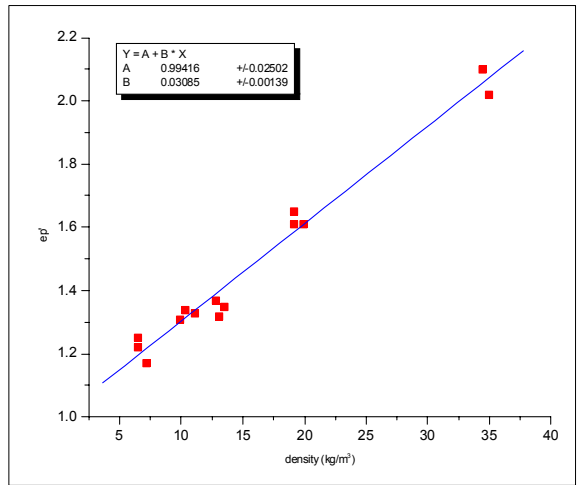


Fig. 4. 유전재료의 유전율(ε') 측정결과와 Curve Fitting 결과

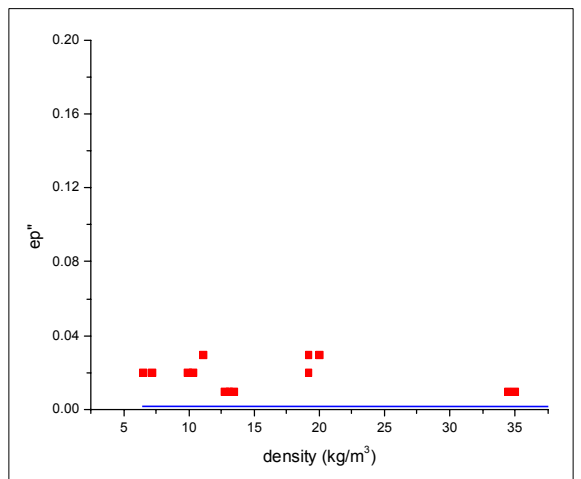


Fig. 5. 유전재료의 유전율(ε'') 측정결과와 Curve Fitting 결과

* 손실재료

$$\epsilon' = 1.136 + 0.056 \times \text{density}$$

$$\epsilon'' = 0.003 \times \exp(\text{density}/2.951)$$

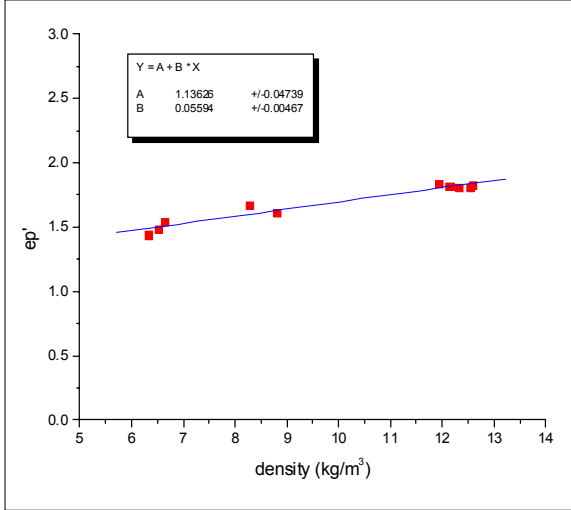


Fig. 6. 손실재료의 유전율(ϵ') 측정결과와 Curve Fitting 결과

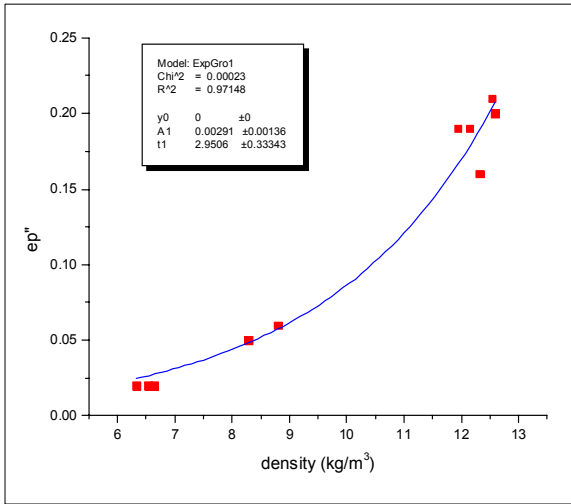


Fig. 7. 손실재료의 유전율(ϵ'') 측정결과와 Curve Fitting 결과

라. 최적화 설계 결과

-20 dB이하 흡수능 최대화를 위한 최적화 설계결과는 Table 1과 Table 2와 같으며 이때 전파흡수능은 Fig. 8과 같다.

Table 1. 설계 최적설계 후 설계변수 값

구 분	유전율 (ϵ')	유전율 (ϵ'')	두께 (mm)	표면저항 (Ω/\square)
흡수층 1	2.4	0.1	4.0	-
저항막	-	-	-	250
흡수층 2	1.7	0.8	5.0	-

Table 2. 최적설계 후 전파흡수능 및 Resonance Frequency

구 분	설계결과
-20dB 이하 흡수능주파수 대역(GHz)	6.9~15.4
Resonance Frequency(GHz)	7.9, 14.1

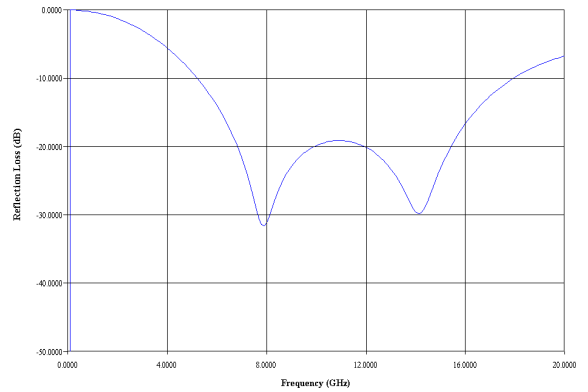


Fig. 8. 최적설계 후 전파흡수능 해석 결과

3. 결론

광대역의 주파수 범위에 대하여 전파흡수능 최적화 설계를 위해 관련 전자기 이론 고찰, 유전재료와 손실 재료의 전자기 물성 측정^[6] 및 DB구축 그리고 최적화 설계를 위한 유전 알고리즘을 적용하였다. 전파 흡수능 최적화 설계결과 6.9~15.4GHz 주파수 대역에서 -20dB이상의 전파흡수능을 가지고 동시에 경량화를 위하여 전파흡수재료의 두께를 최소화한 다층형 구조의 설계결과를 제시하였다. 본연구결과는 전자기 물성 DB를 이용함으로써 실용화가 가능한 설계 결과를 제시하였으며, 향후 광대역 전파흡수재료의 최적화 설계 방법 및 모델을 제안하였다.

Reference

- [1] Edward J. Haug and Jasbir S. Arora, Applied Optimal Design, John Wiley & Sons, 1979.
- [2] Mokhtar S. Bazaraa and C. M. Shetty, Nonlinear Programming, John Wiley & Sons, 1979.
- [3] Daniel S. Weile and Eric Michielssen, Genetic Algorithm Optimization Applied to Electromagnetics, IEEE Trans. on Antennas and Propagation, Vol. 45, No. 3, pp. 343~353, March 1997.
- [4] Eric Michielssen, Jean-Michel Sajer, S. Ranjithan and Raj Mittra, Design of Lightweight, Broad-Band Microwave Absorbers Using Genetic Algorithm, IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, Vol. 41, No. 6/7, pp. 1024~1031, June/July 1993.
- [5] B. Chamber and T. Tennant, Optimised Design of Jaumann Radar Absorbing Materials Using a Genetic Algorithm, IEE Proceedings-Radar, Sonar Navigation Vol. 143, No. 1, pp. 23~30, February 1996.
- [6] David K. Cheng, Fundamentals of Engineering Electromagnetics, Prentice Hall, New Jersey, pp. 228~297, 1993.