

論文 97-34D-3-3

다층 손실 유전체를 이용한 광대역 전파 흡수체 설계

(Design of Broad-Band Radar Absorbing Materials Using Multi-layered Lossy Dielectrics)

李 東 根 *, 南 基 辰 **, 李 相 高 ***

(Dong Geun Lee, Gi Jin Nam, and Sang Seol Lee)

요 약

손실이 있는 다층 유전체를 이용하여 광대역 전파 흡수체를 설계한다. 주어진 주파수 대역에서 반사전력이 허용치 이하로 되게 하기 위하여 각 층의 유전체 두께, 상대 유전율, 손실 탄젠트를 유전자 엘거리즘을 이용하여 최적화한다. 반사계수는 연속 분수식을 이용하여 구한다. 다극 함수(multi-modal function)에 대하여 유전자 엘거리즘의 성능향상을 위해 반복 과정중 새로운 개체군 부분 초기화 방법을 적용한다. 유전체의 상대 유전율과 손실 탄젠트를 다양한 주파수의 함수로하여 5~20GHz 대역의 최적 전파 흡수체를 설계한다.

Abstract

Broad-band RAM's(Radar Absorbing Materials) are designed by multi-layered lossy dielectrics. The depth, the relative permittivity and the loss tangent of each layer are optimized in order to meet the required reflective power over the specified frequency range using a genetic algorithm. The reflection coefficients are calculated by the continued fraction method. A new population model of the partial initialization method during iterations is applied for the multi-modal functions to enhance the performance of the genetic algorithm. The optimal RAM's are designed by setting the relative permittivity and the loss tangent of the dielectrics as a function of the frequency over 5~20GHz.

I. 서 론

위성통신 및 무선통신 수요가 급증하고 각종 전자 장비의 사용이 급증함에 따라 제한된 환경에서 더 많은 통신 수요를 충족시키기 위해 사용 주파수가 점점 높아지고 있다. 불요 전자파로부터 자신을 보호하고 다

른 장치에 전자파 영향을 주지 않도록 하기 위한 전자파 차폐 및 EMI 대책에 관한 연구가 계속되고 있다. 두께가 얇고 가벼우며 광대역의 전자파를 흡수할 수 있는 물질을 찾아내기 위한 연구가 오래 전부터 진행되어 왔다.

그동안 Salisbury 또는 Jaumann 스크린^[1]과 같은 흡수체가 고안되었다. 이들은 근사화된 수식을 사용하거나 공진법을 이용하여 설계된다. 최근에 최적 제어법^[2]을 이용하여 다층 유전체의 두께 및 무게 등을 최소화할 수 있는 흡수체 설계법이 제시되었다. 하지만 이러한 최적 제어 방법들은 초기치의 영향이 매우 크고 때로는 국부 최적치에 수렴하여 최종 최적치를 얻지 못하는 단점을 갖는다.

이러한 단점을 극복하기 위하여 유전자 엘거리즘^[3]을 이용한 전파 흡수체 설계법이 제시되었다. 유전자

* 正會員, 漢陽大學校 電子通信學科

(Dept. of Elec. Comm. Eng., Hanyang Univ)

** 正會員, 漢陽大學校 電子通信工學科, 國立 原州 專門大學 電子通信科

(Dept. of Elec. Comm. Wonju Nat. Jun. Col)

*** 正會員, 漢陽大學校 電子電氣工學部

(School of Electronic and Electrical Eng., Hanyang Univ.)

接受日字:1996年10月25日, 수정완료일:1997年2月21日

앨거리즘은 다른 앨거리즘에 비하여 여러 장점을 갖는다. 첫째, 다른 최적 제어 방법에 비하여 최적 공간 전체를 탐색하므로 초기치의 영향을 받지 않고 광역(global) 최적치를 비교적 잘 찾아낸다. 둘째, 경도법(gradient method)에서와 같이 미분치와 같은 별도의 정보가 필요치 않아 미분이 불가능하거나 미분이 복잡한 함수에도 적용할 수 있으며, 제약 조건을 갖는 변수를 쉽게 적용할 수 있다. 셋째, 유전자 앨거리즘은 단 하나의 해보다는 잠재적인 해들의 집합에 대하여 동시에 병행하여 적용되므로 하나 이상의 해를 찾아낸다. 넷째, 다른 앨거리즘에 비하여 프로그래밍이 용이하다^{1, 3-4)}. 그러나 목적함수가 단극 함수(unimodal function)인 경우에는 기본적 유전자 앨거리즘이 잘 적용되나, 다극 함수(multi-modal function)인 경우에는 탐색 공간중에 극값이 여러 곳에 산재하므로 앨거리즘의 성능이 떨어진다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 본 논문에서는 부분 초기화 방법을 새로이 적용하여 앨거리즘의 성능을 향상시켰다.

이 연구에서는 외부로부터 들어오는 전자파를 산란시키지 않고 유전체 내부에서 흡수시키는 광대역 전파 흡수체를 유전자 앨거리즘에 대하여 설계한다. 각 유전체 층의 두께, 유전율, 손실 탄젠트 등의 설계 변수를 유전자 앨거리즘을 이용하여 최적화한다. 또한 복소 유전율을 다양한 주파수의 함수¹⁵⁾로 가정하고 광대역 전파흡수체를 설계한다.

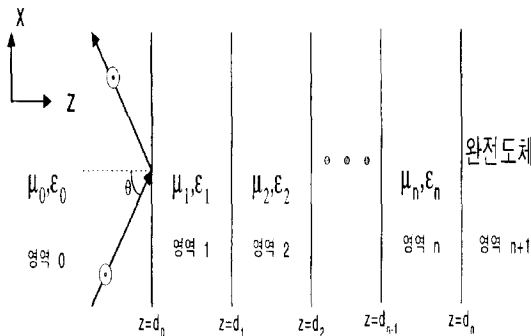


그림 1. 다층 유전체의 구조와 TE 입사파
Fig. 1. The structure of multi-layered dielectrics and the TE incident wave.

II. 다층 유전체의 반사계수

그림 1과 같이 $z=d_0, d_1, \dots, d_n$ 에서 경계를 갖는 다

층 등방성 유전체에 평면파가 입사된다.

유전체가 비자성체이면서 선형, 균일하면

$$\mu = \mu_0 \tag{1}$$

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon'' \tag{2}$$

이고, 손실 탄젠트는 아래와 같다.

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \tag{3}$$

여기서 평면파의 입사면이 x-z축이 되도록 유전체를 z 축에 평행하도록 배열하면 모든 전자계의 벡터는 x와 z만의 함수이다. 따라서 $\frac{\partial}{\partial y} = 0$ 이므로 모든 영역에서 맥스웰 방정식은 이차원 문제로 되며 TE, TM의 두가지 모드로 나뉜다.

영역 n에서 TE 파는 아래와 같고, TM파는 쌍대정리(Duality Theorem)에 의하여 구해진다.

$$E_{ny} = (A_n e^{\gamma_n z} + B_n e^{-\gamma_n z}) e^{-\gamma_n x} \tag{4}$$

$$H_{nx} = -\frac{\gamma_n}{j\omega\mu_n} (A_n e^{\gamma_n z} - B_n e^{-\gamma_n z}) e^{-\gamma_n x} \tag{5}$$

$$H_{nz} = \frac{\gamma_n}{j\omega\mu_n} (A_n e^{\gamma_n z} + B_n e^{-\gamma_n z}) e^{-\gamma_n x} \tag{6}$$

$$\gamma_n^2 = \gamma_{nz}^2 + \gamma_x^2 = -\omega^2 \mu_0 \epsilon_n (1 - j \tan \delta) \tag{7}$$

다층 유전체에 전자파가 입사하면 각각의 영역에서 수많은 반사파와 투과파가 생긴다. 식(4)~(6)에서 A_n 은 -z 방향으로 진행하는 모든 파의 크기의 합을 나타내고 B_n 은 +z 방향으로 진행하는 모든 파의 크기의 합을 나타낸다. 또한 위상 정합¹⁵⁾에 의하여 γ_x 는 모든 영역에서 같은 값을 가진다.

영역 0에서

$$A_0 = RE_0, B_0 = E_0 \tag{8}$$

이다, 또한 영역 n+1은 완전도체이므로

$$A_{n+1} = 0, B_{n+1} = 0 \tag{9}$$

이다. 식 (4)~(6)에 경계조건을 적용하여 정리하면 아래 식을 얻는다.

$$A_n e^{\gamma_n d_n} = \frac{1}{2} (1 + \rho_{n(n+1)}^{TE}) [A_{n+1} e^{\gamma_{n+1} d_n} + R_{n(n+1)}^{TE} B_{n+1} e^{-\gamma_{n+1} d_n}] \tag{10}$$

$$B_n e^{\gamma_{nd_n}} = \frac{1}{2} (1 + \rho_{n(n+1)}^{TE}) [R_{n(n+1)}^{TE} A_{n+1} e^{\gamma_{(n+1)d_n}} + B_{n+1} e^{\gamma_{(n+1)d_n}}] \quad (11)$$

여기서

$$\rho_{n(n+1)}^{TE} = \frac{\mu_n \gamma_{(n+1)z}}{\mu_{n+1} \gamma_{nz}} = \frac{\gamma_{(n+1)z}}{\gamma_{nz}} \quad (12)$$

$$R_{n(n+1)}^{TE} = \frac{1 - \rho_{n(n+1)}^{TE}}{1 + \rho_{n(n+1)}^{TE}}, \quad R_{(n+1)n}^{TE} = -R_{n(n+1)}^{TE} \quad (13)$$

이다. 식(10)과 식(11)을 정리하면 $\frac{A_n}{B_n}$ 은 아래와 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} \frac{A_n}{B_n} &= e^{-2\gamma_{nd_n}} \frac{A_{n+1} e^{\gamma_{(n+1)d_n}} + R_{n(n+1)}^{TE} B_{n+1} e^{-\gamma_{(n+1)d_n}}}{R_{n(n+1)}^{TE} A_{n+1} e^{\gamma_{(n+1)d_n}} + B_{n+1} e^{-\gamma_{(n+1)d_n}}} \\ &= \frac{e^{-2\gamma_{nd_n}}}{R_{n(n+1)}^{TE}} + \frac{\left(1 - \frac{1}{R_{n(n+1)}^{TE}}\right) e^{-2(\gamma_{(n+1)z} + \gamma_{nz})d_n}}{\frac{1}{R_{n(n+1)}^{TE}} e^{-2\gamma_{(n+1)z}d_n} + \frac{A_{n+1}}{B_{n+1}}} \end{aligned} \quad (14)$$

따라서 반사 계수 $R = \frac{A_0}{B_0}$ 은 식(14)를 적용하여 연속 분수식(continued fraction equation) 으로 구해진다.

TM 파에 대하여는 식(13), 식(14)에

$$\rho_{n(n+1)}^{TM} = \frac{\epsilon_n \gamma_{(n+1)z}}{\epsilon_{n+1} \gamma_{nz}} \quad (15)$$

$$R_{n(n+1)}^{TM} = \frac{1 - \rho_{n(n+1)}^{TM}}{1 + \rho_{n(n+1)}^{TM}}, \quad R_{(n+1)n}^{TM} = -R_{n(n+1)}^{TM} \quad (16)$$

을 대입하여 구한다.

III. 유전자 엘거리즘

유전자 엘거리즘의 개념은 Holland에 의해 제안되었고, De Jong에 의하여 Darwin의 자연선택과 진화의 개념을 따르는 탐색 전략 최적화 엘거리즘으로 확장되었다. 한 유전자 엘거리즘이 수행되는 동안 하나의 가능한 해의 집합이 선택되고, 이 해의 집합은 목적함수의 선택적 제약에 따라 최적의 해로 진화한다.

유전자 엘거리즘에서 가능한 해의 집합은 한 개체군(Population)으로 나타난다. 가능한 해는 염색체(Chromosome)로 코딩되고, 목표함수에 의하여 적합치를 부여 받는다. 적합치는 목표함수에 의해 개체에 할당되는 적자성의 정도이고, 유전자 엘거리즘을 적용하여 목

표 함수를 최소화하는 변수를 구하여 문제를 해결한다. 유전자 엘거리즘은 염색체를 파라미터의 배열로 정의함으로써 시작한다. 함수체 설계시 파라미터는 각 층의 유전체의 상대 유전율, 손실 탄젠트 및 유전체의 두께이다. j번째 물질에 대한 유전체의 상대 유전율은 N_e 개 비트로 다음과 같다.

$$E_j = \epsilon_j^1 \epsilon_j^2 \dots \epsilon_j^{N_e} \quad (17)$$

식(17)에 의하여 $[E_{min}, E_{max}]$ 범위의 상대 유전율은 $\frac{E_{max} - E_{min}}{2^{N_e} - 1}$ 의 정밀도를 갖고 $[0, 2^{N_e} - 1]$ 로 매핑된다. j번째 물질의 두께와 손실 탄젠트는 각각 식(18), (19)와 같다.

$$T = t_j^1 t_j^2 \dots t_j^{N_e} \quad (18)$$

$$L = l_j^1 l_j^2 \dots l_j^{N_e} \quad (19)$$

식(17)~(19)에 의하여 N_{tot} 개의 층을 가지는 함수체의 염색체는 다음과 같이 표시된다.

$$\text{염색체} = [E_1 E_2 \dots E_{N_e}, L_1 L_2 \dots L_{N_e}, T_1 T_2 \dots T_{N_e}] \quad (20)$$

엘거리즘의 초기에 위와 같이 N_{pop} 의 염색체가 무작위로 생성되면 각각의 염색체는 목적함수에 의하여 적합치가 부여되고, 이 적합치에 따라 재생산 과정시 선택된다. 각각의 염색체가 선택될 확률은 식(21)로 정의된다.

$$p_k = \frac{F_k}{\sum_{i=1}^{N_{pop}} F_i} \quad (k=1, \dots, N_{pop}) \quad (21)$$

F_k = k번째 염색체의 적합치

비교제 추정 샘플링 방법(Remainder stochastic sampling without replacement)에서 각각의 염색체는 p_k 의 정수 부분이 우선적으로 선택되고, 나머지(remainder) 소수점 값들에 룰렛 휠 방법을 적용하여 선택될 염색체를 결정한다. 선택 과정을 통하여 높은 적합치를 가지는 염색체는 더 많이 남게되고, 낮은 적합치를 가지는 염색체는 도태된다.

그러나 일반적으로 유전자 엘거리즘의 초기에 다른 염색체에 비하여 높은 적합치를 갖는 몇몇의 염색체가 개체군에 나타나는 경우가 있다. 만일 기본적인 선택 방법(simple GA selection method)을 사용하게 되면,

이 염색체들이 개체군의 상당한 부분을 차지하게 되고 그에 따라 엘거리즘은 초기에 국부 최적치에 수렴하게 된다^[41]. 이러한 단점을 극복하기 위하여 선택 과정 전에 적합치 스케일링 (fitness scaling)을 사용하여 개체군의 모든 염색체들의 적합치를 재조정한다^{[41][8]}. 선형 스케일링 (linear scaling)^{[41][7]}에서 새롭게 조정된 적합치 F_k 는 다음과 같이 정의된다.

$$F_k = aF_k + b \quad (k=1, \dots, N_{pop}) \quad (22)$$

선형 스케일링을 통하여 높은 적합치를 갖는 염색체의 새로운 적합치는 상대적으로 낮게 조정되고, 낮은 적합치를 갖는 염색체의 새로운 적합치는 높게 조정된다. 따라서 엘거리즘 수행동안 더 넓은 탐색 공간을 탐색하여 광역 최적치를 찾는다.

교배(cross over)는 높은 적합치를 가지는 개체를 합하여 그 보다 더 높은 적합치를 갖는 새로운 개체를 만드는 연산으로, 선택 과정을 통하여 선택된 염색체들에 대하여 실행된다. 우선 두 개의 염색체(선조 염색체)가 개체군으로부터 선택되고, 그 다음 새로운 염색체(후손 염색체)가 p_{cross} 의 확률을 가지고 생성된다. 균일 교배(uniform crossover)에서 자녀 염색체의 각각의 유전인자는 임의로 발생된 교배 마스크(crossover mask)에 따라서 부모 중 하나의 유전인자를 그대로 받는다^[7]. p_{cross} 는 보통 $0.8 < p_{cross} < 1$ 의 범위를 가진다. 돌연변이 연산자는 $p_{mutation}$ 의 확률로 염색체의 한 비트를 0에서 1로 혹은 1에서 0으로 바꾼다. 일반적으로 돌연변이 확률은 0.01%~0.5% 정도로 매우 작으며, $p_{mutation}$ 가 커지면 높은 적합치를 가지는 염색체에 들어있는 정보가 파괴될 가능성이 높아진다. 돌연변이 과정은 개체군의 다양성을 유지하기 위해 새로운 탐색 공간을 탐색하도록 한다^[41]. 이러한 재생산, 교배, 돌연변이 형성의 과정들을 통하여 초기 개체군은 새로운 개체군으로 바뀌며 높은 적합치를 갖는 개체군 선정을 위한 반복 과정을 통하여 최적치에 수렴하게 된다.

목적함수가 단극 함수(unimodal function)인 경우에는 이러한 기본적 유전자 엘거리즘(Simple genetic algorithms)이 잘 적용되나, 다극 함수(multi modal function)의 경우에는 성능이 떨어진다. 다극 함수에서 최적치를 구하기 위해서는 탐색공간중에 여러 곳에 극값이 존재하므로 개체군에 다양한 염색체들이 존재해야 한다.

DeJong은 다중 극값 함수에서 엘거리즘의 성능을 향상시키기 위해서 밀집 인자 모델(Crowding factor model)^{[41][8]}을 제시하였다. 일반적으로 자연에서는 제한된 자원(먹이나 서식처)에 대하여 경쟁이 심해지면 출생률이 떨어지고, 각 개체의 수명이 줄어들 듯이 엘거리즘에서 새롭게 생성된 염색체들은 개체군의 다양성을 위하여 그와 가장 비슷한 선조와 대체된다.

개체군 부분 초기화 방법에서는 다양성 유지를 위하여 재생산 단계에서 제약을 가하는 밀집 인자 모델과는 달리 수렴 판정 결정 절차에서 제약을 가한다. 일반적으로 엘거리즘이 특정한 값에 수렴하여 반복이 계속 되어도 더 이상 새로운 값을 찾아내지 못하면 대개 정해진 반복수(최대 반복수)에서 엘거리즘을 정지시키고, 다시 실행한다. 하지만 새로 제안하는 부분 초기화법에서는 그림 2처럼 최대 허용 반복수에 비하여 훨씬 적은 반복 횟수 동안에 엘거리즘이 특정한 값에 수렴하면 개체군중 적합치가 높은 일부분을 남기고 나머지 염색체들을 임의로 교체시킨다. 이렇게 함으로써 이제까지 가장 좋은 염색체를 생존시켜 지금까지 얻은 정보 중 좋은 정보를 다음 세대에 전해 주고, 새로운 탐색 공간으로 탐색 해가는 반복과정을 통하여 다극 함수에서의 성능 저하를 극복한다. 또한 이 과정을 통하여 기존의 방법보다 빨리 수렴하게 된다.

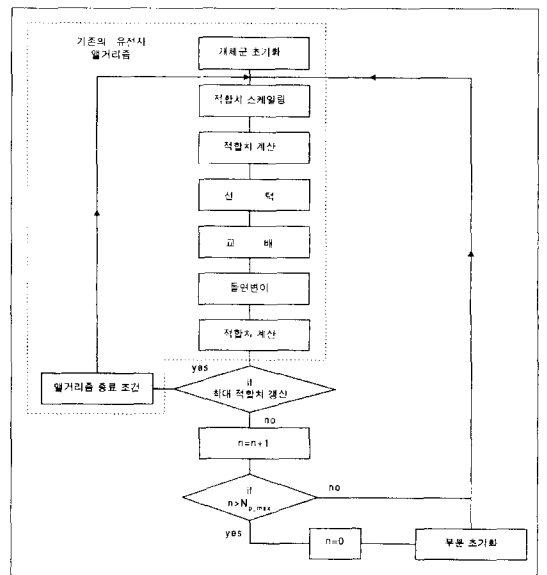


그림 2. 제안된 부분 초기화법을 이용한 유전자 엘거리즘의 순서도
Fig. 2. Flow chart of the GA using the proposed partial initialization method.

IV. 시뮬레이션 결과 및 고찰

위의 방법을 이용하여 4개의 층으로 이루어진 전파 흡수체를 설계한다. 앨거리즘의 목적함수는 식(14)로부터 유도되는 반사 계수 $R = \frac{A_0}{P_0}$ 로부터 다음과 같이 정의한다.

$$Q = \int_{f_{min}}^{f_{max}} |R|^2 df \quad (23)$$

광대역 흡수 물질 개발이 가능하도록 설계변수에 제약을 둔다. 주파수 대역은 5~20GHz로 하고 수직 입사하는 TE파에 대하여 반사전력이 1%이내이면 양호한 것으로 판정한다. 유전율과 손실 탄젠트는 주파수에 따라 그 값이 달라지고 또 물질에 따라서 그 변화하는 폭이 다르다¹⁵⁾. 대부분의 유전체의 상대 유전율과 손실 탄젠트는 낮은 주파수에서는 크게 변화하다가 주파수가 높아질수록 그 변화가 줄어든다.

표 1. 상대 유전율과 손실 탄젠트의 주파수에 따른 변화

Table 1. The variation of relative permittivities and loss tangents as a function of frequency.

물질	$\epsilon_r(f)$	$\tan \delta(f)$
모델1	주파수와 무관	주파수와 무관
모델2	$\epsilon_r(f) = \epsilon_r(f_{max}) + a - \frac{af}{f_{max}}$	$\tan \delta(f) = \tan \delta(f_{min}) + b - \frac{bf}{f_{min}}$
	i) $a=0.35$ ii) $a=0.15$	$b=0.05$ $b=0.05$
모델3	$\epsilon_r(f) = \epsilon_r(f_{max}) \left(\frac{f_{max}}{f}\right)^a$	$\tan \delta(f) = \tan \delta(f_{min}) \left(\frac{f_{min}}{f}\right)^b$
	i) $a=0.55$ ii) $a=0.3$	$b=0.55$ $b=0.55$
모델4	$\epsilon_r(f) = \epsilon_r(f_{max}) \left(\frac{f_{max}-f_c}{f-f_c}\right)^a$	$\tan \delta(f) = \tan \delta(f_{min}) + b - \frac{bf}{f_{min}}$
	i) $a=1.4$ $b=0.05$ ii) $a=1.2$ $b=0.05$	$f_c = 2GHz$ $f_c = 2GHz$

이 연구에서는 기존의 유전체의 상대 유전율과 손실 탄젠트의 주파수 특성을 참고로 하여 표 1과 같이 크게 4가지 형태의 물질로 나누고 그 물질들을 이용하여 광대역 전파 흡수체를 설계한다. 모델 1의 물질은 상대 유전율과 손실 탄젠트가 주파수에 따라 변하지 않는 경우이고 모델 2는 유전율과 손실 탄젠트가 주파수에

따라 선형적으로 변하는 경우이다. 모델 3과 모델 4는 유전율과 손실 탄젠트가 주파수에 반비례하는 경우로서 모델 4는 그 변화 폭이 매우 큰 경우이다.

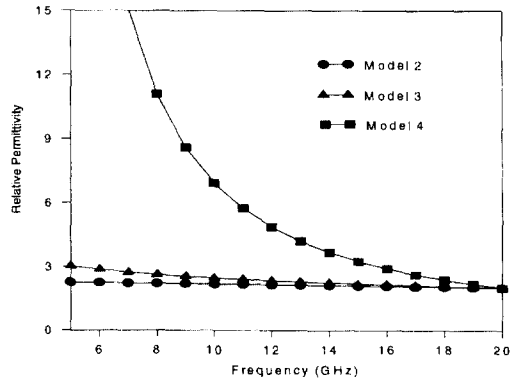


그림 3. 각 모델의 상대 유전율의 주파수 특성
Fig. 3. Frequency characteristics of the relative permittivity in each model.

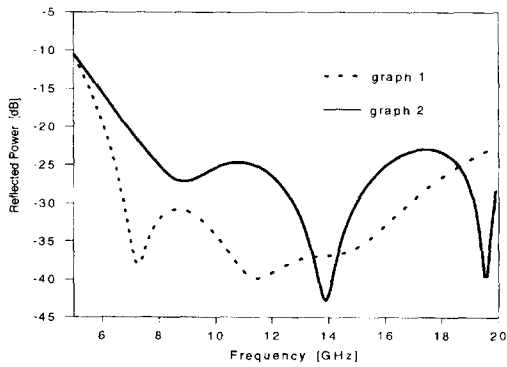
그림 3은 5~20GHz의 주파수 대역에서 모델 2~모델 4의 상대 유전율의 변화를 나타낸다. 그림 4는 유전율과 손실 탄젠트가 주파수의 함수가 아닐 때의 설계치와 그 때의 반사전력을 나타낸다. 두께가 두꺼울수록 흡수효과가 증가함을 볼 수 있다. 그림 5는 유전율과 손실 탄젠트가 모델 2의 경우처럼 변화할 때의 설계치와 반사전력을 나타낸다. 손실 탄젠트의 함수는 고정시키고 유전율의 함수만을 변화시켰을 때 유전율 변화가 더 큰 경우에 비슷한 평균 반사전력에 대하여 두께가 줄어드는 것을 볼 수 있다. 또한 모델 1과 비교할 때 같은 평균 반사전력에 대하여 전체 유전체 층의 두께가 얇아진다. 그림 6은 모델 3의 설계치와 반사전력을 나타낸다. 이때에도 대체로 상대 유전율의 변화가 큰 쪽이 비슷한 평균 반사 전력에 대하여 두께가 더 얇아짐을 볼 수 있다. 그림 7은 모델 4의 설계치와 반사전력을 나타낸다. 두께가 각각 6.93, 6.33mm로 상당히 얇아졌으나, 상대 유전율의 변화폭이 크고 또한 그 값도 매우 커서 실제로 제작하기가 어렵다.

모델 1~모델 4까지는 전파 흡수체를 주파수 특성이 모두 같은 물질로 설계하였으나 모델 5와 모델 6은 표 2와 같이 서로 다른 주파수 특성을 갖는 물질을 혼합하여 설계한다. 그림 8과 그림 9는 각각 모델 5와 모델 6의 설계치와 반사전력을 나타낸다. 주파수 특성이 다른 물질을 혼합하여 전파 흡수체를 설계할 경우 특성이 같은 물질로 설계했을 경우보다 두께가 줄어든다.

표 2. 모델 5와 모델 6의 각층의 구성 물질
Table 2. The composite materials of model 5 and model 6.

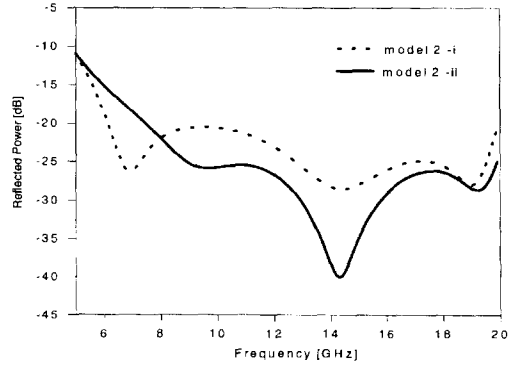
층	모델 5	모델 6
1	모델 2 -i	모델 2 -i
2	모델 2 -ii	모델 2 -i
3	모델 3 -i	모델 3 -i
4	모델 3 -ii	모델 3 -i

각각의 설계 변수 중에서 상대 유전율의 범위가 반사 전력에 미치는 영향은 그리 크지 않았으나 두께와 손실 탄젠트의 범위는 얼거리즘의 수렴에 상당한 영향을 끼친다. 두께가 두꺼울수록 얼거리즘의 수렴 속도가 빨라지고 좋은 흡수성을 얻게 된다. 손실 탄젠트도 두께와 마찬가지로 그 값이 클수록 수렴속도가 빨라지고 전자와 흡수특성도 좋아진다. 또한 상대 유전율과 손실 탄젠트가 주파수에 따라 변하지 않을 때보다 주파수의 함수로 변화할 때 전자와 흡수성이 좋아지고, 여러 물질을 혼합하였을 때 전자와 흡수성이 향상된다.



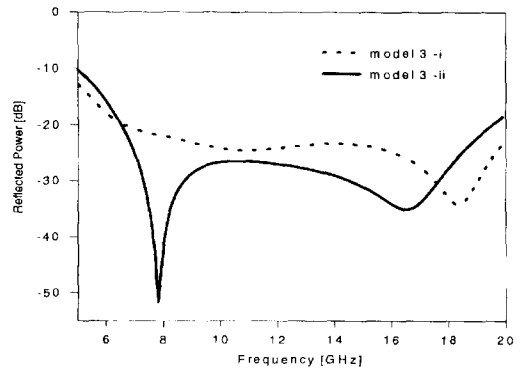
층 번호	그래프 1			그래프 2			
	ϵ_r	두께	$\tan \delta$	ϵ_r	두께	$\tan \delta$	
1	1.10686	4.81904mm	0.803178	2.17532	4.05495 mm	0.8108328	
2	3.53254	0.23297mm	0.038903	11.6223	2.144078 mm	0.4290035	
3	14.9516	1.89801mm	0.316778	5.313128	0.013461 mm	0.0029989	
4	1.34263	5.70880mm	0.951517	15.46405	4.49089 mm	0.899775	
평균반사전력	0.07%	두께	12.66mm	평균반사전력	0.24%	두께	10.712mm

그림 4. 모델 1의 설계치와 반사전력
Fig. 4. The design variables and their reflected power.



층 번호	모델 2-i			모델 2-ii			
	ϵ_r	두께	$\tan \delta$	ϵ_r (5GHz)	두께	$\tan \delta$ (5GHz)	
1	2.341024	3.937143 mm	0.999237	2.012401	4.439019 mm	0.983751	
2	13.25325	2.137370 mm	0.522440	9.267332	2.190941 mm	0.488209	
3	4.626219	0.103609 mm	0.011223	3.653808	0.1005372 mm	0.0225285	
4	19.96735	3.900012 mm	0.974306	16.74164	4.300024 mm	0.955549	
평균반사전력	0.43%	두께	10.12mm	평균반사전력	0.24%	두께	10.95mm

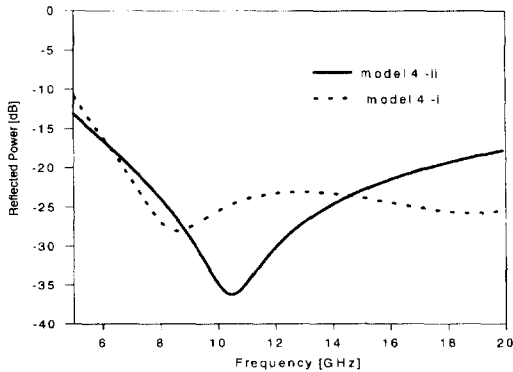
그림 5. 모델 2의 설계치 및 평균 반사전력
Fig. 5. The design variables and their reflected power.



층 번호	모델 3-i			모델 3-ii			
	ϵ_r (5GHz)	두께	$\tan \delta$ (5GHz)	ϵ_r (5GHz)	두께	$\tan \delta$ (5GHz)	
1	4.094887	4.072137 mm	0.946831	2.87223	4.44059 mm	0.986730	
2	27.68065	0.54002 mm	0.127255	12.82817	2.246154 mm	0.490081	
3	25.96455	2.365537 mm	0.5489121	8.164142	0.039660 mm	0.084183	
4	9.743097	0.096606 mm	0.0226201	19.50288	4.139407 mm	0.9316617	
평균반사전력	0.53%	두께	7.075mm	평균반사전력	0.18%	두께	10.92mm

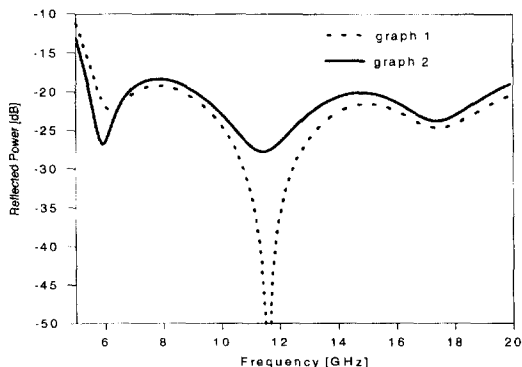
그림 6. 모델 3의 설계치 및 평균 반사전력
Fig. 6. The design variables and their reflected power.

실제 이론적으로 제시된 최적 설계 파라미터를 이용한 전자 흡수체의 제작을 위해서는 먼저 제시된 주파수 특성을 나타내는 상대 유전율과 손실 탄젠트의 값을 갖는 물질의 개발이 필요하며, 각 층의 유전체의 두께의 변화에 따라 전체적 특성이 상당히 민감하므로 각층의 유전체 두께를 고르게 제작하여 접합하는 기술이 선결적으로 필요하다.



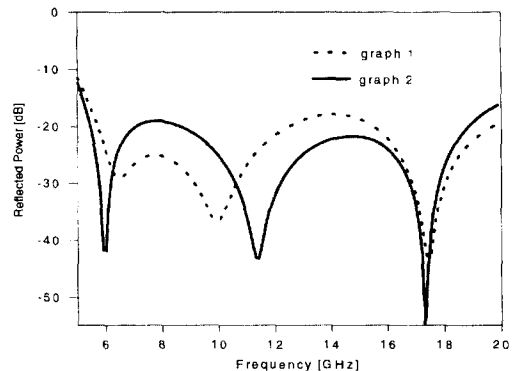
층 번호	모델 4-i			모델 4-ii			
	ϵ_r (5GHz)	두께	$\tan \delta$ (5GHz)	ϵ_r (5GHz)	두께	$\tan \delta$ (5GHz)	
1	117.842	0.17371 mm	0.043736	20.32149	2.46586 mm	0.837206	
2	20.7314	2.797538 mm	0.094988	24.8820	2.457876 mm	0.8192750	
3	23.6380	3.833805 mm	0.094812	87.01031	1.388613 mm	0.4622801	
4	115.249	0.127100 mm	0.030783	73.18285	0.004396 mm	0.0017478	
평균반사전력	0.47%	두께	6.93mm	평균반사전력	0.40%	두께	6.33mm

그림 7. 모델 4의 설계치 및 평균 반사전력
Fig. 7. The design variables and their reflected power.



층 번호	그래프 1			그래프 2			
	ϵ_r (5GHz)	두께	$\tan \delta$ (5GHz)	ϵ_r (5GHz)	두께	$\tan \delta$ (5GHz)	
1	3.980164	1.749573 mm	0.0999661	3.833915	1.877538 mm	0.5074880	
2	6.557343	3.500000 mm	0.0999990	5.836655	3.608742 mm	0.9752829	
3	29.16737	0.222222 mm	0.0635712	27.73198	0.142760 mm	0.0387930	
4	22.07219	0.335496 mm	0.0333396	9.833979	0.338828 mm	0.0918281	
평균반사전력	0.4%	두께	5.80 mm	평균반사전력	0.65%	두께	5.97mm

그림 8. 모델 5의 설계치 및 평균 반사전력
Fig. 8. The design variables and their reflected power.



층 번호	그래프 1			그래프 2			
	ϵ_r (5GHz)	두께	$\tan \delta$ (5GHz)	ϵ_r (5GHz)	두께	$\tan \delta$ (5GHz)	
1	3.912240	2.045421 mm	0.5112871	6.447148	0.452674 mm	0.1225351	
2	6.464405	3.736364 mm	0.0333550	4.017114	3.672894 mm	0.992524	
3	25.65731	0.270574 mm	0.0577822	7.041319	3.328645 mm	0.809468	
4	22.73341	0.289133 mm	0.0724968	26.74813	0.123786 mm	0.033575	
평균반사전력	0.33%	두께	6.34mm	평균반사전력	0.39%	두께	7.58mm

그림 9. 모델 6의 설계치 및 평균 반사전력
Fig. 9. The design variables and their reflected power.

V. 결론

완전 도체위에 코팅된 다층 유전체의 반사계수를 연속 분수식 형태로 구하고 유전자 앨거리즘을 이용하여 전자흡수체를 설계하였다. 유전체 층의 수는 4개로 하였으며, 5~20GHz 주파수 대역에 대하여 반사전력이 1% 이하로 되게 하기 위하여 각 층의 비자성 유전체의 두께, 상대 유전율, 손실 탄젠트를 유전자 앨거리즘

을 이용하여 최적화하였다.

상대 유전율과 손실 탄젠트가 주파수에 대하여 변하지 않는 경우와 주파수의 함수인 경우에 대하여 전파 흡수체를 설계하였고, 서로 다른 주파수 특성을 가지는 유전체를 혼합하여 설계하였다.

흡수체를 하나의 물질로만 설계하는 경우보다 여러 물질을 혼합하여 설계하는 경우에 흡수체의 두께가 얇아졌고, 하나의 물질만으로 설계하는 경우에는 상대 유전율과 손실 탄젠트가 주파수에 따라 변화할 때 두께가 더 얇아졌다.

다극 함수(multi-modal function)에 대하여 유전자 알고리즘의 성능향상을 위해 반복과정중 새로운 개체군 부분 초기화 방법을 적용하여 수렴 속도가 향상되었다.

참 고 문 헌

- [1] X. Knot, X. Schaeffer, and X. Tuley, *Radar Cross Section*, Dedham, MA: Artech House, 1986, ch. 9.
- [2] J. Pesque, D. Bouche, and R. Mittra, "Optimization of Multilayered antireflection coatings using an optimal control method," *IEEE Trans. MTT*, vol. 40, pp. 1789-1796, Sept. 1992
- [3] E. Michielssen, J. M. Sajer, S. Ranjithan, and R. Mittra, "Design of lightweight, broad-band microwave absorbers using genetic algorithms," *IEEE Trans. MTT*, vol. 41, pp. 1024-1031, Jul. 1993
- [4] E. D. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Reading, MA: Addison-Wesley, 1989
- [5] A. V. Hippel, *Dielectric Materials and Applications*, Artech House, 1995
- [6] J. A. Kong, *Electromagnetic Wave Theory, 2nd*, John Wiley & Sons, 1990
- [7] D. Whitley, "A genetic algorithm tutorial", Technical Report, cs-93-103, Department of computer science, Colorado State University, Nov. 1993
- [8] L. Chambers, *Practical Handbook of Genetic Algorithms NewFrontiers, Volume 2*, CRC press, 1995

저 자 소 개



李東根(正會員)

1971년 8월 15일생. 1995년 2월 한양대학교 전자통신공학과 졸업(학사). 1997년 2월 한양대학교 대학원 전자통신공학과 졸업(석사). 1997년 3월 ~ 현재 한양대학교 대학원 전자통신공학과 박사과정 재학중. 주관심 분야는 마이크로웨이브 소자, 안테나 전자파 전파 등임

李相高(正會員) 第31卷 A編 參照

현재 한양대학교 전자전기공학부 교수

南基辰(正會員) 第32卷 A編 參照

현재 국립 원주 전문대학교 교수, 한양대학교 전자통신공학과 박사과정 재학중