

論文95-32A-1-8

다층유전체를 이용한 광대역 전파흡수체 최적 설계

(Optimum Design of Broadband RAM(Radar Absorbing Material)'s Using Multi-layer Dielectrics)

南基辰*, 李相高*

(Nam Gi Jin, Lee Sang Seol)

요약

외부로 부터 입사되는 전자파를 유전체 내부에서 감쇄시켜 반사되는 에너지를 최소화하는 광대역 흡수체 구현을 위해 유전체를 다층으로 배열하고 유전체의 유전상수, 두께, 손실 탄젠트 등의 설계 변수를 최적화하였다. 유전체 내의 반사파에 대한 파동 임피던스를 구하고, 전송선 이론으로 입력 임피던스와 반사계수식을 유도하고, 수치 해석 방법인 수정된 Powell법을 적용하여 최소 평균 반사 전력과 그 때의 설계 변수를 구하였다. 설계 변수에 제약 조건을 갖는 경우 수정된 Powell법을 적용하여 4층 유전체 배열에서 총 두께가 1.1 cm, 평균 반사 전력이 0.85%로 매우 양호한 결과를 얻었다.

Abstract

In order to implement broadband RAM's(Radar Absorbing Materials) made up of multiple dielectric layers, the design variables such as the dielectric constants, the depths and the loss tangents of dielectric are optimized. The wave impedances regarding the reflective wave are found in dielectrics, input impedances and reflection coefficients with multiple dielectric layers are derived from the transmission line circuit theory. Finally, minimum average reflective power and optimum design variables are obtained by applying the numerical technique, called modified Powell method. In case of four dielectric layers with inequality constraints in design variables, a quite favourable and feasible result with the total depth of 1.1 cm, the average reflective power of 0.85 % over the broadband frequency range is obtained for a specific example.

I. 서론

전기 통신 수요가 급증하고 전자 장비의 사용이 급

증함에 따라 제한된 환경에서 더 많은 통신 수요를 충족시키기 위해 사용 주파수가 점점 높아지고 있다.

이에 따라 저주파에서 문제가 되지 않았던 현상들이 주파수가 높아짐에 따라 전자파 상호 간섭에 의한 여러가지 문제가 발생하고 있다. 불요 전자파로부터 자신을 보호하고 다른 장치에 전자파 영향을 주지 않도록

* 正會員, 漢陽大學校 電子通信科

(Dep. of Elec. Communication, Han Yang Univ.)

接受日字 : 1994년 7월 22일

하기위한 전자파 차폐 및 EMI대책에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 한 예로 스텔스(stealth)와 같은 군사용 항공기를 은폐하기 위한 방법으로 두께가 얇고 가벼우며 광대역 마이크로 웨이브에 대하여 전자파를 흡수하는 전자파 흡수 물질(Radar Absorbing Materials)에 대한 연구는 이미 오래전부터 수행되어 큰 성과를 얻었다. 하나 국내에서는 이 분야의 연구가 미흡한 상태에 있다. 일반적으로 전파흡수체로는 페라이트(ferrite)가 포함된 자성 전자파 흡수체를 쓰고 있으나 철을 포함하고 있어 무거운 단점을 갖는다.^[1]

이 연구에서는 유전체를 다층으로 배열하고, 광대역에서 평균 반사 전력을 최소화하는 수치 제어 앨거리즘인 수정된 Powell법을 적용하여 각 유전체층의 유전율, 두께, 손실 탄젠트 등의 최적 설계변수를 구하였다.

II. 다층유전체의 반사 계수

1. 파동 방정식

손실이 있는 유전체 영역에 파가 입사되면, 관련 영역 내에는 전하와 전류가 존재한다. ϵ 과 μ 가 상수인 단순 매질내에서 \vec{E} 와 \vec{H} 가 시간에 따라 변화할 경우 맥스웰 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = J + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon} \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (4)$$

여기서 ρ 는 체적 전하밀도이고 J 는 전류밀도이다. 유전체의 전도도를 σ 라 할 때 식 (2)는 아래와 같이 변환된다.

$$\nabla \times \vec{H} = (\sigma + j\omega\epsilon)\vec{E} = j\omega(\epsilon + \frac{\sigma}{j\omega})\vec{E} = j\omega\epsilon_c\vec{E} \quad (5)$$

여기서 실효복소유전율 ϵ_c 는 다음과 같이 정의 된다.

$$\epsilon_c = \epsilon - j\frac{\sigma}{\omega} = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (6)$$

여기서 $\sigma = \omega\epsilon''$ 이고, ϵ 을 복소유전율 ϵ_c 로 바꾸면 완전 유전체에 대한 모든 방정식들은 손실을 갖는 유전체에 대한 방정식으로 바뀌 쓸 수 있고, 손실 탄젠트를 다음과 같이 표시된다.

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} = \frac{\sigma}{\omega \cdot \epsilon} \quad (7)$$

(1), (2), (5), (6)을 이용하여 다음 파동 방정식을 얻는다.

$$\nabla^2 \vec{E} = j^2\omega^2\mu\epsilon(1 + \frac{\sigma}{j\omega\epsilon})\vec{E} = \gamma^2 \vec{E} \quad (8)$$

여기서 $\gamma^2 = j^2\omega^2\mu\epsilon(1 + \frac{\sigma}{j\omega\epsilon})$ 이다.

2. 전송행렬

매질이 다층으로 배열되어 있는 경우 각층을 전송선로로 보아 그림 1과 같이 전송행렬을 이용하여 유전체층을 표현할 수 있다.^[2]

$$V_1 = AV_2 + BI_2 \quad (9)$$

$$I_1 = CV_2 + DI_2 \quad (10)$$

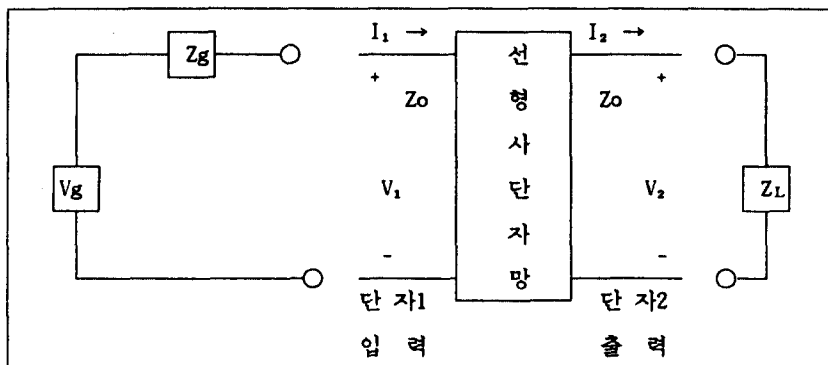


그림 1. 선형 입, 출력회로와 전송 행렬

Fig. 1. Linear input output network and it's transmission matrix.

부하임피던스가 Z_L 인 4단자망의 입력임피던스는 다음과 같다.

$$Z_m = \frac{V_1}{I_1} = \frac{AZ_L + B}{CZ_L + D} \quad (11)$$

4단자망의 길이가 l , 전파상수가 γ , 다음단에서 본 입력 임피던스가 Z_L 일때 전송 파라미터는 아래와 같다.

$$A = \cosh \gamma l \quad (12)$$

$$B = Z_0 \sinh \gamma l \quad (13)$$

$$C = \frac{\sinh \gamma l}{Z_0} \quad (14)$$

$$D = \cosh \gamma l \quad (15)$$

3. 다층 유전체의 반사계수

그림 2는 각기 다른 유전체로 이루어진 N층 구조체를 보여주고 있다. i 층에서의 유전율은 ϵ_i , 손실탄젠트는 $\tan \delta_i$, 그리고 두께는 l_i 로 주어진다. i 층에서의 전송행렬을 다음과 같이 정의한다.

$$M_i = \begin{bmatrix} A_i & B_i \\ C_i & D_i \end{bmatrix} \quad (16)$$

여기서, 전송행렬 M_i 의 각항은 식(12)에서 식(15)로 정의된다. 금속과 접한 유전층에서 본 입력 임피던스 $Z_m^{(1)}$ 는 Z_L 이 0 이므로

$$Z_m^{(1)} = \frac{B_1}{D_1} \quad (17)$$

이고, 그외의 i 에 대한 입력 임피던스 $Z_m^{(i)}$ 는

$$Z_m^{(i)} = \frac{AZ_m^{(i-1)} + B_i}{CZ_m^{(i-1)} + D_i} \quad (18)$$

이다. 여기서 $Z_m^{(i-1)}$ 은 1층에서부터 순차적으로 계산되므로, 최종적으로 $Z_m^{(N)}$ 이 계산된다. 최외각층에서의 반사계수 Γ_N 은 $Z_m^{(N)}$ 으로부터 다음과 같이 계산된다.

$$\Gamma_N = \frac{Z_m^{(N)} - Z_0}{Z_m^{(N)} + Z_0} \quad (19)$$

여기서 Z_0 는 자유공간의 파동 임피던스로서 377 Ω 이다.

III. 최적화 알고리즘

전파 흡수 물질에서 반사계수는 물질의 유전율, 손실탄젠트, 물질의 두께 및 주파수등 설계 변수의 함수로 주어지며 이러한 반사계수를 최소로 하기 위해서는 최적제어 개념을 도입하여 가격함수(여기서는 반사계수식)를 최소화하는 설계 변수값을 구해야 한다. 다시말하면 넓은 주파수 대역에서 반사계수를 최소화하기 위해서는 유전율, 손실탄젠트, 물질의 두께등의 변수를 최적화하는 제어 알고리즘을 적용해야 한다.

자유공간	N매질		1매질	
.....	$\epsilon_N, \mu_N, \eta_N,$	$\epsilon_1, \mu_1, \eta_1,$	금속
$Z_m^{(N)}$ ->	$\tan \delta_N, l_N$	$Z_m^{(1)}$ ->	$\tan \delta_1, l_1$	
Γ_N		Γ_1		

그림 2. N층의 다층 유전체 구조

Fig. 2. The structure of N multiple dielectric layers.

적절한 제어 엘거리즘을 선정할때 목표함수의 특성, 제약조건, 수렴 속도, 계산시간 및 기억용량 등을 고려해야 할 것이다. 광대역 흡수체 물질구현에 적합한 엘거리즘 선정을 위해 여러가지 최적화 방법이 연구되었다. 그 중 J. Perini는 입사각이 변함에 따라 최적 광대역 흡수체 설계시 수정된 Powell 최적화 방법을 적용한바 있다.^[3]

Powell법은 도함수를 구하지 않는 방법 중 가장 많이 쓰이는 방법으로 2차 목표 함수의 최소값을 지나는 선은 항상 동일 각도에서 등고선과 교차한다는 원리에 근거한 쾨주게이트(conjugate)방향 탐색법이다. 이 방법은 올바른 탐색 방향을 결정하기 위해 반복의 과거 궤적을 효과적으로 이용하여 초기치 설정이 최소점에서 많이 벗어난 경우에도 비교적 빨리 수렴하는 장점을 갖는다.^[4-7]

Powell법은 반복할 때마다 임의의 시작점 x_0 로 부터 시작하여 n개의 선형 독립 방향(conjugate direction set) s_1, s_2, \dots, s_n 을 구하는 것이다. 이 방향은 초기에 좌표방향으로 설정되고 한번 반복에서 한 변수만을 변화시키면서 변수 갯수 만큼 최소값을 찾아 다음 반복에서는 한 새로운 방향 s_m 을 정의하고 쾨주게이트 방향을 생성하여 n개의 s_2, s_3, \dots, s_m 을 기본으로 새로운 방향을 다시 탐색한다.

목표함수가 2차형인 경우 k번 반복 후 n개의 방향중 k개의 서로(mutually) 공액관계에 있는 방향을 구할 수 있다. 패턴 방향 $s_{p1}, s_{p2}, s_{p3}, \dots, s_{pm}$ 은 각각 방향 $s_n, s_{n-1}, s_{n-2}, \dots, s_{n-m+1}$ 을 따라 구한 최소값을 연결하는 선이다.

Powell의 기본 절차에 따라 한 반복 과정을 정리하면 다음과 같다.

- ① $i=1, 2, \dots, n$ 에 대하여 함수 $f(x_{i-1} + \lambda s_i)$ 가 최소 되는 λ_i 를 구하고 $x_i = x_{i-1} + \lambda_i s_i$ 로 놓는다.
- ② $i=1, 2, \dots, n-1$ 에 대하여 s_i 를 s_{i+1} 로 대체한다.
- ③ s_n 을 $x_n - x_0$ 로 대체한다.
- ④ 함수 $f(x_n + \lambda(x_n - x_0))$ 가 최소로 되는 λ 를 구하고 x_0 를 $x_0 + \lambda(x_n - x_0)$ 로 대체한다.

그림 3과 그림 4는 위의 절차를 설명하기 위한 유통도이다.

변수가 2개일때 처음에는 x_1, x_2 좌표 방향을 따라, 이후에는 대응 패턴 방향(s_1 방향)을 따라 최소화 방향을 탐색하면 점 4에 도달한다. 다음 반복에서 좌표 방향의 하나를 (여기서는 x_1)제거하고 대신 패턴 방향 s_1 을 사용하여 u_2, s_1 방향을 따라 최소화하면 점 6을

얻는다. 이때 새로운 패턴 방향 s_2 를 발생시키고 점 7로 부터 시작하여 s_1, s_2 방향을 최소화하면 점 8, 9가 차례로 얻어진다. 이 때 다음 반복에서는 버릴 좌표 방향이 없으므로 좌표축에 평행한 방향을 따라 모든 절차를 다시 시작하여 최소치가 얻어질 때까지 계속된다. 이 과정을 도시한 것이 그림 4의 유통도이고 여기서 쾨주게이트 방향은 순차적으로 $s_{p1}, s_{p2}, \dots, s_{pm}$ 이고 s_i 는 좌표 방향 u_i 이다. 그러나 초기 근사화가 양호하지 않거나 또는 탐색 방향이 선형 종속인 경우 Powell법은 만족스런 결과를 얻지 못하므로 보다 많은 반복횟수가 필요하고 이를 보완하기 위해 수정된 Powell법이 제시되었고 이에 대한 자세한 설명은 참고문헌^[6]에서 상세히 기술된다.

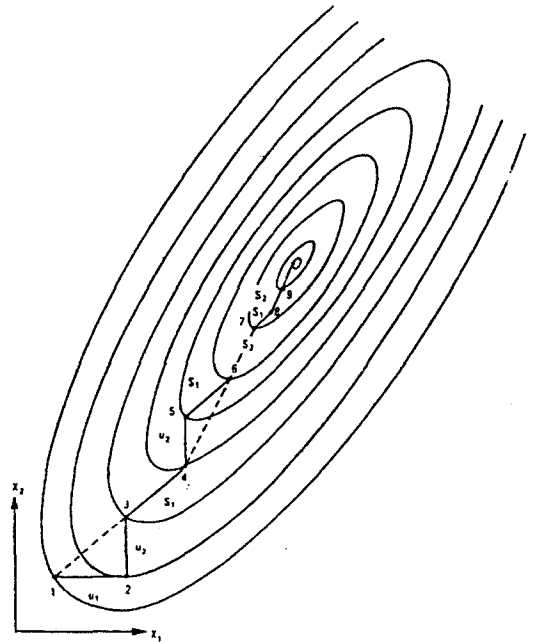


그림 3. Powell의 쾨주게이트 방향법
Fig. 3. Powell's conjugate direction method.

IV. 시뮬레이션 결과 및 고찰

최적화 엘거리즘의 소프트웨어 구성 블록은 그림 5와 같다. GSS(Golden Section Search)블록은 1차원 최소화에서 각 구간을 황금율로 분할하여 최소값을 탐색한다. QUAD(QUADRATIC Interpolation) 블록은 최소값을 구하고 ONEDI(ONE Dimension Interface)블록은 Powell 엘거리즘으로 부터 1차원

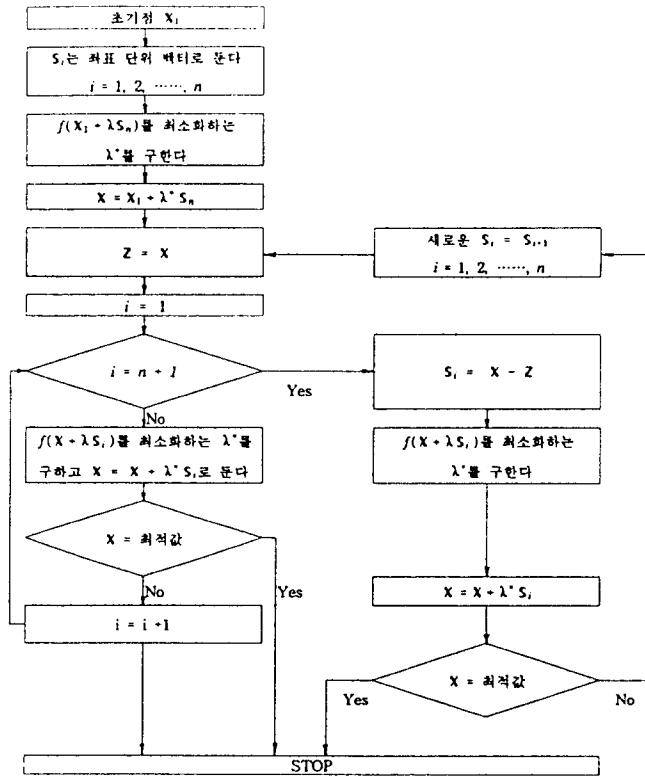


그림 4. Powell 엘거리즘의 유통도

Fig. 4. The flow chart of Powell's algorithm.

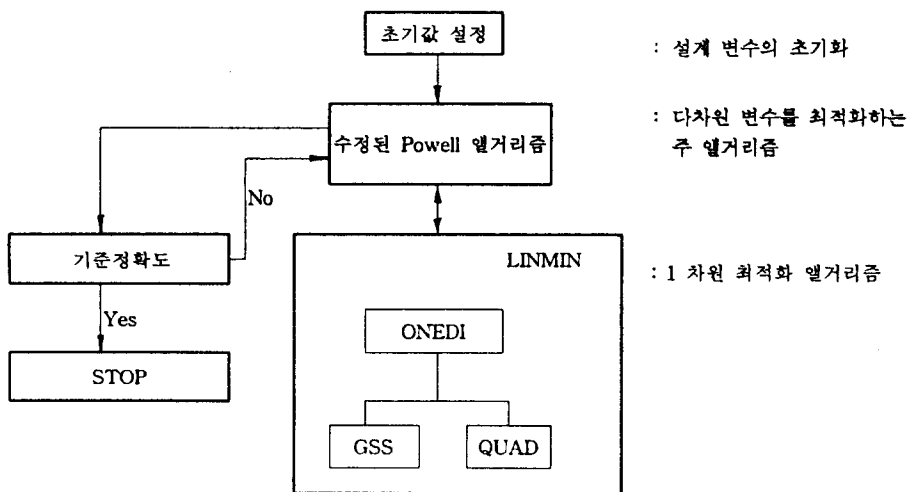


그림 5. 최적화 소프트웨어의 구성 블록

Fig. 5. The structure of optimum software blocks.

최소화의 조건을 판정하여 GSS 또는 QUAD 블록으로 보내 수행된 결과를 다시 받아 Powell로 보내는 인터페이스 기능을 수행하는 블록이다. 수정된 Powell 알고리즘에서는 X가 변수 벡터, λ가 최적화 계수, S가 방향 벡터일 때 함수 $f(x_i + \lambda_i S_i)$ 를 최소화하는 λ_i^* 를 LIN MIN을 이용하여 구하고 x_i 를 $x_i + \lambda_i^* S_i$ 로 대체하여 n개의 변수(x_n)를 계속하여 구한다. 다음 반복에서는 시작점과 초기 방향을 바로 전 반복 과정에서 구한 갱신된 값으로 대체시켜 기존 정확도를 만족할 때까지 반복 과정을 계속한다.^[8]

이 연구의 목표는 그림 6과 같이 4계층으로 유전체를 배열하였을 때 반사계수를 광대역에서 최소화하는 설계 변수, 즉 매질의 유전율(ϵ_r), 손실 탄젠트($\tan \delta$), 매질의 두께(l)를 구하는 것이다.

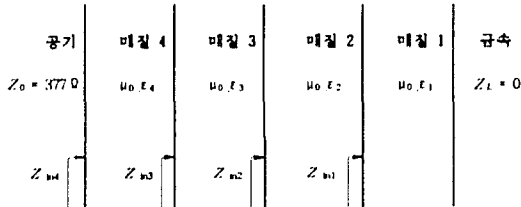


그림 6. 광대역 흡수물질의 유전체 배열
Fig. 6. The distribution of Broadband RAMs.

식 (12) ~ (16)로부터 i번째 매질에 대한 전송 행렬의 요소는 각각 다음과 같다.

$$\begin{cases} A_i = \cosh \gamma_i l_i \\ B_i = \sinh \gamma_i l_i \\ C_i = \frac{\sinh \gamma_i l_i}{Z_i} \\ D_i = \cosh \gamma_i l_i \end{cases} \quad (20)$$

여기서 γ_i 는 복소 전파상수로 다음과 같다.

$$\gamma_i = j\omega\sqrt{\mu_0\epsilon_{ci}} = j\omega\sqrt{\mu_0\epsilon(1-j\tan\delta)} \quad (21)$$

여기서 손실탄젠트($\tan\delta$)는 전도도(σ), 유전율(ϵ) 및 주파수의 함수로서 식 (7)에서 주어진다.

또한 식 (11)에 의해 Z_{in1} , Z_{in2} , Z_{in3} , Z_{in4} 를 구할 수 있다.

$$\begin{cases} Z_{in4} = \frac{A_4 Z_L + B_4}{C_4 Z_L + D_4} = \frac{B_4}{D_4} \quad (Z_L = 0) \\ Z_{in3} = \frac{A_3 Z_{in4} + B_3}{C_3 Z_{in4} + D_3} \\ Z_{in2} = \frac{A_2 Z_{in3} + B_2}{C_2 Z_{in3} + D_2} \\ Z_{in1} = \frac{A_1 Z_{in2} + B_1}{C_1 Z_{in2} + D_1} \end{cases} \quad (22)$$

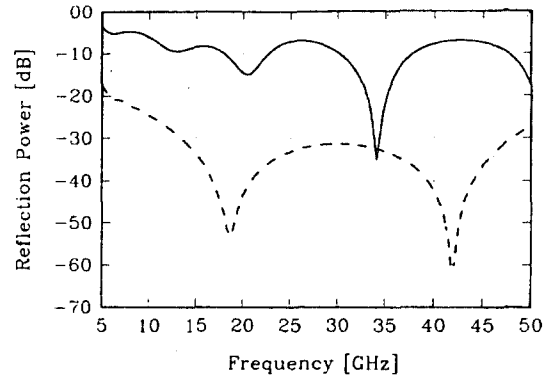
이때 공기에서 본 다층 유전체의 총 반사계수 Γ_{tot} 은 다음과 같다.

$$\Gamma_{tot} = \frac{Z_{in4} - Z_0}{Z_{in4} + Z_0}, \quad 0 \leq |\Gamma_{tot}| \leq 1 \quad (23)$$

여기서 반사계수 Γ_{tot} 의 절대값을 제공하고 주파수에 대하여 적분한 값을 목표함수 Q로 놓는다.

$$Q = \int_{f_{min}}^{f_{max}} \left| \frac{Z_{in4} - Z_0}{Z_{in4} + Z_0} \right|^2 df \quad (24)$$

여기서 Q는 반사전력에 비례하는 물리량으로 볼 수 있으며 편의상 반사전력으로 간주하고, 설계 변수에 제약을 가하지 않은 경우 f_{min} 은 1 GHz, f_{max} 는 50 GHz이고, 설계 변수에 가한 경우 f_{min} 은 5 GHz, f_{max} 는 20 GHz로 선택하였다.



[초기변수값]

layer	1	2	3	4
ϵ_r	10	5	3	1
l	2	3	2	3
$\tan\delta$	1	0.01	0.001	0.1

[최적변수값]

layer	1	2	3	4
ϵ_r	6.54	8.01	-0.33	6.04
l	78.71	0.71	0.13	0.87
$\tan\delta$	0.92	1.58	0.81	-0.01
iteration	60	cost	0.000989	

----- 초기 변수의 반사전력
———— 최종 변수의 반사전력

그림 7. 경우 1의 반사변수와 반사전력
Fig. 7. The design variables and its reflective power in case 1.

처음에는 설계 변수(ϵ_r , $\tan\delta$, l)에 제약을 가하지 않고 1~50 GHz의 주파수 대역에서 목표함수 Q와 반

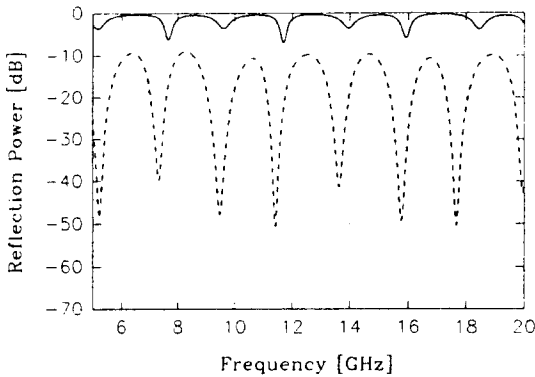
복 횡수 및 최적 변수 값을 구하였고, 다음에는 실용성 있는 결과를 얻기 위해 설계 변수에 제약을 가하였다. 즉 $1 \leq \epsilon_r \leq 20$, $10^{-7} \leq \tan \delta \leq 1$, $1 \leq l \leq 20$ mm의 범위로 하고, 주파수 대역은 5~20 GHz로 축소하였다. 또한 Q 값(반사 전력)이 5% 이내이면 양호한 것으로 판정하였다.

수정된 Powell 알고리즘에서도 다른 최적 제어 알고리즘에서와 마찬가지로 초기값에 크게 의존되어 특정 주파수에서 반사전력이 0에 가까운 값으로 되어 (Z_{in} 이 Z_0 에 근접) 계산 도중 오버플로우(overflow)가 발생하였다. 먼저 설계 변수에 제약을 가하지 않고 수정된 Powell법을 적용하였을 때 초기값에 따라 최적 설계 변수와 반사전력값이 결정되었으나 그림 7과 같이 최적 설계 변수 중 유전 상수, 손실 탄젠트가 음수 값을 가져 실현 불가능이 되었다.

고리침의 반복 계산 빈도, cost는 반사전력의 주파수에 대한 적분값이고, 도표에서 손실 탄젠트 값은 주파수에 반비례하므로 편의상 중간 주파수인 10 GHz 때의 값을 계산하여 표시하였다.

또한 설계 변수에 제약을 두고 반사전력과 설계 변수를 구하는 과정에서 1차원 최소화시 변수가 경계를 벗어나면 양 경계점의 중간에서 다시 최적값을 탐색하도록 알고리즘을 수정하였다. 설계 변수가 제한되는 경우 4층 유전체 배열에서 모두 12개의 설계 변수를 최적화할 때 유전체의 총 두께와 반사전력에서 만족한 결과를 얻지 못해, 다시 유전체 두께를 고정시키고 반사전력과 최적 설계 변수를 구하였다.

4층의 유전율, 유전체 두께, 손실 탄젠트 등 총 12개의 설계 변수를 최적화할 때 초기 설계 변수값의 변화에 따라 반사전력은 4.5% 이상, 유전체의 총두께는 2 - 3.5 cm로 되었고 그림 8은 그 중 한 경우를 보여 주고 있다. 유전층의 두께를 고정시켜 설계 변수(8개)를 구한 경우에는 반사 전력이 0.8 - 3.6 % 정도로 개선되었다.



[초기변수값]

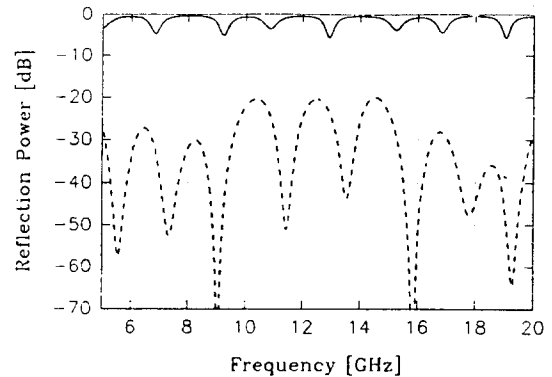
layer	1	2	3	4
ϵ_r	2	3	3	10
l	10	7	7	10
$\tan \delta$	0.005	0.005	0.005	0.005

[최적변수값]

layer	1	2	3	4
ϵ_r	15.963	10.967	8.639	4.879
l	7.9	0.994	4.657	10.456
$\tan \delta$	0.011	0.0039	0.0543	0.204
iteration	43	cost		0.0714

그림 8. 경우 2의 반사변수와 반사전력
Fig. 8. The design variables and its reflective power in case 2.

그림 7 - 그림 11에서 초기변수의 값을 그림에서 도표와 같이 결정하였을 때 최적 변수 및 반사전력을 구한 결과로서, 실선은 초기 변수값에서 주파수 변화에 따른 반사전력을, 점선은 최적 변수값에서의 반사전력을 각각 표시하며 또한 iteration은 Powell법에서 알



[초기변수값]

layer	1	2	3	4
ϵ_r	5	3	3	8
l	10	7	7	10
$\tan \delta$	0.005	0.005	0.005	0.005

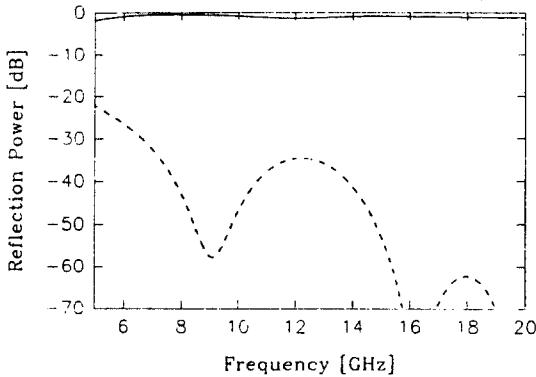
[최적변수값]

layer	1	2	3	4
ϵ_r	8.1449	5.0188	4.864	1.6989
l	10	7	7	10
$\tan \delta$	0.09623	0.1464	0.003	0.306
iteration	15	cost		0.0122

그림 9. 경우 3의 반사변수와 반사전력
Fig. 9. The design variables and its reflective power in case 3.

하지만 그림 8, 9와 같이 특정 주파수에서 반사계수

가 크게 증가하여 광대역 특성을 잃게 되었다. 특히 이 현상은 유전체의 두께가 클수록 자주 발생하게 된다. 그림 10, 11은 두께를 좀 더 얇게 고정시켜 최적 조건을 추출한 경우이다. 그림 11에서 유전층의 총두께가 1.1cm일 때 반사전력이 0.85%로서 매우 좋은 특성을 보였다.



[초기변수값]

layer	1	2	3	4
ϵ_r	6.7	6.2	3.3	4
l	4	2	2	4
$\tan\delta$	0.005	0.015	0.015	0.015

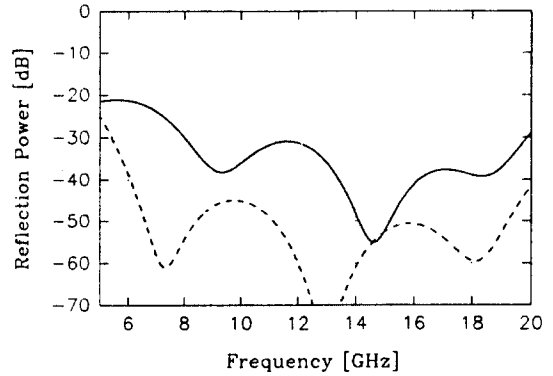
[최적변수값]

layer	1	2	3	4
ϵ_r	8.753	4.957	3.2094	1.5279
l	4	2	2	4
$\tan\delta$	0.9751	0.6614	0.0031	0.17023
iteration	185	cost	0.0198	

그림 10. 경우 4의 반사변수와 반사전력
Fig. 10. The design variables and its reflective power in case 4.

V. 결 론

이 연구에서는 다층 유전체 경계면에 대한 경계 조건을 적용하여 반사파에 대한 파동 임피던스를 구하고, 전송선 이론을 도입하여 입력 임피던스와 반사 계수식을 전송 행렬로 구하였다. 다층 유전체로서 광대역 흡수체를 설계하기 위해, 수정된 Powell 알고리즘을 적용하였다. 설계 변수에 제한을 두지 않고 1~50 GHz 대역에서 최소 반사 전력과 최적 설계 변수를 구하였으나 실현성이 없으므로 설계 변수를 실현가능한 값으로 제한하고 주파수 대역을 5~20 GHz로 하여 유전체의 두께를 줄여가면서 최소 반사 전력과 최적 설계 변수를 계산하였다.



[초기변수값]

layer	1	2	3	4
ϵ_r	10.2304	1.4530	2.0219	1.77
l	2	3	3	3
$\tan\delta$	0.88412	0.00866	0.9827	0.0791

[최적변수값]

layer	1	2	3	4
ϵ_r	8.0316	1.9975	1.8958	1.5718
l	2	3	3	3
$\tan\delta$	0.8927	0.8017	0.6464	0.01184
iteration	66	cost	0.0085	

그림 11. 경우 5의 반사변수와 반사전력
Fig. 11. The design variables and its reflective power in case 5.

수정된 Powell 알고리즘의 1차원 최소화 과정에서 설계 변수가 제한된 영역을 벗어나면 중간값에서 다시 탐색하도록 알고리즘을 수정하였고, 반사 전력이 5% 이내이면 양호한 것으로 판정하였다. 총두께가 1.1 cm인 4층 유전체에서 반사 전력을 0.85%로 제한할 수 있는 매우 양호한 설계 변수값을 얻었다.

※ 이 연구는 한국통신학술 진흥재단의 연구비로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] B. Lax, and K.J.Button, Microwave Ferrites and Ferrimagnetics, McGraw-Hill, New York, pp.297-322, 1962.
- [2] P. A. Rizzi, Microwave Engineering: Passive Circuit, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, pp.534-545, 1988.
- [3] J.Perini, L.Cohen, "Design of Broadband

- Radar Absorbing Materials for Large Angles of Incidence", IEEE Tran. on Electromagnetic Compatibility, Vol.35, No. 2, May 1993.
- [4] S. S. Rao, Optimization Theory and Applications, John Wiley & Song, 1984.
- [5] G. V. Reklaitives, Engineering Optimization Methods & Application, pp.87-97, 1983.
- [6] M. J. Powell, " An efficient method for finding the minimum of a function of several variables without calculating derivatives", *Computer Journal*, vol 7, pp. 155-162, 1964.
- [7] R. P. Brent, Algorithms for Minimization without Derivatives, chapter.5 & chapter 7, Prentice-Hall, 1973
- [8] W. H. Press, et.al, Numerical Recipes in FORTRAN, Cambridge, Kala, pp. 387 - 413, 1992.

----- 저 자 소 개 -----



南基辰(正會員)

1958년 5월 20일 생. 1981년 한양대 전자공학과 졸업. 1984년 한양대 대학원 전자공학과 졸업(공학 석사). 1993년 3월~현재 한양대학교 전자통신과 박사과정 재학 중. 1984년 3월~1989년 4월 한국전자통신연구소 연구원 1989년 5월 1993년 4월 금성정보통신(주) 선임 연구원 1993년 9월~현재 국립원주전문대학 전자통신과 전임강사 주관심 분야는 마이크로웨이브, 전파전파, 초고속통신망, ATM 스위치 임.

李相高(正會員) 제31권 A편 제11호 참조.

현재 한양대학교 전자통신공학과 교수.