

단일편파용 광대역 전파흡수체의 설계에 관한 연구

김 동 일* · 이 수 영** · 정 세 모*

A Study on Design of Broadband Electromagnetic Wave Absorber for Single Polarization

Dong-Il Kim · Su-Young Lee** · Se-Mo Chung**

<목 차>	
Abstract	IV. 결 과
I. 서 론	V. 결 론
II. 등가재료정수법	References
III. 광대역 전파흡수체의 설계	

Abstract

A design method of an electromagnetic wave absorber with ferrite fins in the second layer, which has very wide band frequency characteristics, is proposed and discussed. A theoretical model using the equivalent material constants method is adopted, assessed for its accuracy by comparison with the Hashin-Shtrikman formulas and compared with the conventional absorbers.

Based on the model, a wide band electromagnetic wave absorber with excellent reflectivity frequency characteristics in frequency range of 30MHZ to 3530MHZ has been designed.

I. 서 론

최근 사무자동화, 공장자동화등으로 인해 전파의 이용이 대폭적으로 증대됨에 따라 EMI(전자파장해, Electromagnetic Interference)가 심각한 문제로 대두되고 있다. EMI 및 EMC(전자파환경

양립성, Electromagnetic Compatibility)대책을 위하여 다양한 전파흡수체가 개발되어 부분적으로 이용되고 있지만, 사용할 수 있는 주파수대역이 좁거나 치수가 과대하여 유효공간을 확보하기 어려운 문제가 있다. 예로, 종전부터 텔레비전 고스트(TV Ghost)방지용으로 -20dB의 전파흡수능을

* 정회원, 한국해양대학교 전자공학과

** 정회원, 경남전문대학 전자과

만족시키기에는 미흡하다[1][2]. 격자(Grid)형 페라이트 전파흡수체 또한 30-780MHZ에서 -20dB의 전파흡수능을 가지고 있는 실정이다[1]. 한편, 30MHZ이상의 모든 주파수대역을 cover하기 위해 피라미드(Pyramid)형 전파흡수체가 이용되고 있으나 높이가 3.7m나 되기 때문에 매우 넓은 공간을 필요로 하여 전파흡수체가 차지하는 유효공간이 과대해지는 점과 경년변화에 따른 전파흡수성능의 열화도 무시 할 수 없다. 이런 점들을 감안하면 앞으로의 전파흡수체는 30MHZ이상의 전 주파수대를 cover할 수 있는 두께가 얇은 전파흡수체가 되어야 할 것이다.

본 논문에서는 이용가능한 주파수범위가 넓으면서도, 제작이 용이한 전파흡수체를 개발하기 위하여 1층에 타일형 페라이트를 배치하고 제2층에 핀(Fin)형 페라이트를 적층한 2층구조의 페라이트 전파흡수체를 제안하였으며, 수직편파(Vertical Polarized Wave) 및 수평편파(Horizontal Polarized Wave)를 해석하기 위하여 등가재료정수법을 이용하여 각 편파에 대한 최적형상 및 치수를 구하고, 각 편파별 전파흡수능을 기존의 전파흡수체와 비교 검토하였다.

II. 등가재료정수법

어떤 구조의 주기가 파장에 비해 짧을때 주기적인 구조는 실효 매질로 대체할 수 있다는 Homogenization이론에 입각하여, 그림 1과 같은 주기적인 흡수체를 해석 할 수 있다[3]-[7]. 먼저, 그림2와 같이 y방향의 폭 W, 두 평판사이의 간격이 g인 평행 평판 전송선에서 z방향으로 전류가 흐르는 경우, z방향으로 단위길이당 용량과 인덕턴스를 계산한다. 이 경우 단위길이당 용량은 식(1)과 같다[8].

$$\frac{C}{a} = \frac{\epsilon W}{g} \quad (1)$$

여기서, C는 평행 도체판간의 총용량이며, ϵ 은 전송선로에 채워진 물질의 유전율이다.

또한, 단위길이당 인덕턴스는 식(2)와 같이 주어진다.

$$\frac{L}{a} = \frac{g\mu}{W} \quad (2)$$

여기서, L은 평행 도체판간의 총합성인덕턴스이며, μ 는 전송선로에 채워진 물질의 투자율이다. 이와 같은 계산 방법을 이용하여 전계가 대지면에 수평인 수평편파에 응용할 수 있는 광대역 전파흡수체를 설계하기 위해 그림3과 같은 모델로 확장해 보았다. 그림 3(a)에서 a는 x, y방향에서의 주기이고, b는 흡수체의 폭이다. 흡수체의 배열이 x, y축에 대칭이기 때문에 그림3(a)에 있는 흡수체의 성질을 살펴보기 위해서는 점선 부분만을 고려하면 된다. 이 부분을 그림3(b)에 나타내었다. 수평편파에 대한 합성용량 C^H 는 등질로 채워진 부분으로 나누어 계산한 후 그림4에 표시한 직렬부분과 병렬부분을 합성하면 된다.

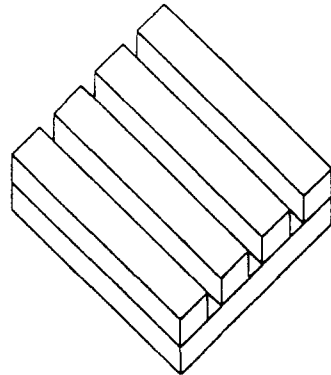


그림 1. 주기적 핀 페라이트흡수체
Fig. 1 A Periodic Fin Ferrite Absorber.

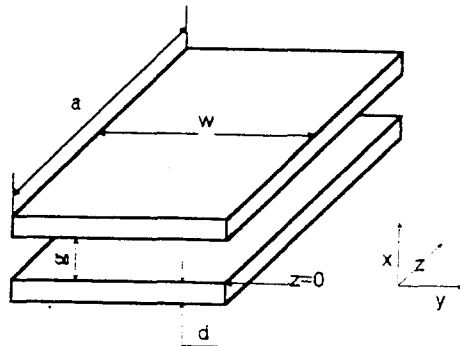


그림2. 평행판 전송선
Fig.2 A Parallel Plate

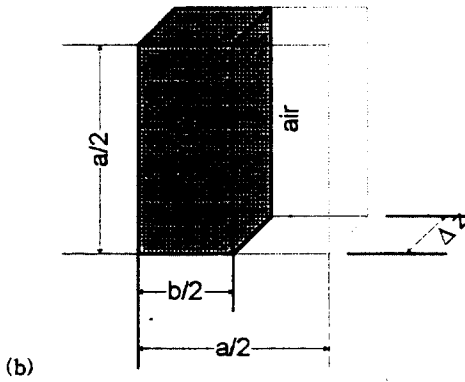
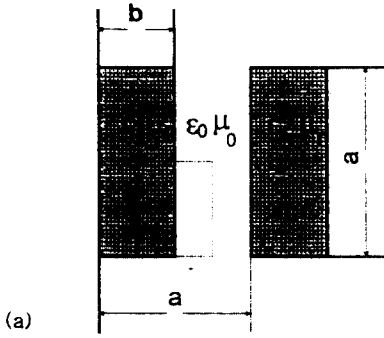


그림 3. (a) 핀 페라이트의 배열
 (b) 등가재료정수 계산을 위한 모델
 Fig. 3 (a) A Array of Fin Ferrite.
 (b) A Model for Calculation of Equivalent Matrial Constant.

$$C^H = C_1 + C_2 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r a \Delta z}{(a-b)\epsilon_r + b} \quad (3)$$

$$C_1 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r a \Delta z}{b}$$

$$C_2 = \frac{\epsilon_0 a \Delta z}{a-b}$$

여기서, ϵ_r 은 빗금친 부분에 채워진 페라이트 재료의 비 유전율이며, ϵ_0 는 진공의 유전율이다. 그러므로, 그림 3-(b)에서 Δz 의 두께를 가지는 구조에 대한 등가유전율 ϵ_{eq} 는 식 (4)와 같이 계산할 수 있다.

$$\epsilon_{eq} = \frac{C^H}{\epsilon_0 \Delta z} \quad (4)$$

식(3)을 식(4)에 대입하면, 그림 3와 같은 구조에 대한 등가유전율 ϵ_{eq} 는 식(5)와 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \epsilon_{eq} &= \epsilon_r \frac{a}{(a-b)\epsilon_r + b} \\ &= \frac{\epsilon_r}{(1-\sqrt{g})\epsilon_r + \sqrt{g}} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, $g = b^2/a^2$ 는 페라이트가 차지하는 체적을 나타낸다. 또한, 그림2 에서 L을 자기 인덕턴스라고 하면, ga구역을 자르는 자속은 식(6)로 주어진다.

$$\Phi = B_y g a \quad (6)$$

그리고, 자속 밀도 B_y 는 식(7)과 같다.

$$WB_y = \mu I \quad (7)$$

자기 인덕턴스 L은 식(8)와 같이 된다.

$$LI = \Phi \quad (8)$$

한편, 자기 인덕턴스 L은

$$L \frac{dI}{dt} = \frac{d\Phi}{dt} \quad (9)$$

이므로, 식(7)~식(9)로 부터 단위길이당 인덕턴스 (L/a)는 식(10)과 같이 계산 할 수 있다.

$$\frac{L}{a} = \frac{g\mu}{W} \quad (10)$$

그림 3 (b)를 이용하여 그림5와 같이 수평편파의 합성 인덕턴스 모델을 만들수 있으며, 수평편파의 합성인덕턴스 L^H 은 식(10)을 확장하여 식(11)과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} L^H &= L_1 + L_2 \\ &= \frac{(a-b)\mu_0\mu_r b \Delta z}{a(a-b)\mu_r + ab} \end{aligned} \quad (11)$$

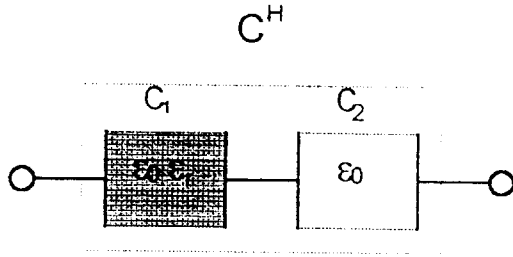


그림 4. 수평편파의 합성용량 모델
Fig. 4 A Synthesized Capacitance Model for Horizontal Polarized Wave

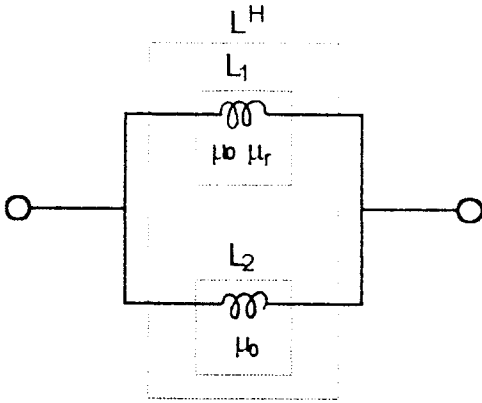


그림 5. 수평편파의 합성인덕턴스 모델
Fig. 5 A Synthesized Inductance Model for Horizontal Polarized Wave

$$L_1 = \frac{\mu_0(a-b)\Delta z}{a}$$

$$L_2 = \frac{\mu_0\mu_r b\Delta z}{a}$$

여기서, μ_r 은 그림2의 빗금친 부분에 채워진 페라이트 재료의 비투자율이며, μ_0 는 진공의 투자율이다. 따라서, 그림 2에서 Δz 의 두께를 가지는 구조에 대한 등가투자율 μ_{eq} 는 식(12)와 같이 계산 할 수 있다.

$$\mu_{eq} = \frac{L^H}{\mu_0\Delta z} \quad (12)$$

식(11)을 식(12)에 대입하면 그림 2와 같은 구조

에 대한 등가 투자율 μ_{eq} 는 식(13)과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \mu_{eq} &= \mu_r \frac{b(a-b)}{a\mu_r b + a(a-b)} \quad (13) \\ &= \frac{\sqrt{g}(1-\sqrt{g})}{\mu_r\sqrt{g} + (1-\sqrt{g})} \end{aligned}$$

여기서, $g=b^2/a^2$ 는 페라이트가 차지하는 체적을 나타낸다.

이상으로 수평편파에 대한 등가유전율 ϵ_{eq} , 등가 투자율 μ_{eq} 을 계산하였다.

다음으로 전계가 대지면에 수직인 수직편파에 대한 등가유전율 ϵ_{eq} , 등가투자율 μ_{eq} 을 구하기 위해 수평편파에 적용한 평행판 전송선을 이용하여 수직편파의 합성 용량 C^V 을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} C^V &= C_1 + C_2 \\ &= \frac{(\epsilon_0\epsilon_r a(a-b) + \epsilon_0 ab)\Delta z}{b(a-b)} \quad (14) \end{aligned}$$

여기서,

$$C_1 = \frac{\epsilon_0\epsilon_r a\Delta z}{b}$$

$$C_2 = \frac{\epsilon_0 a\Delta z}{(a-b)}$$

여기서, ϵ_r 은 빗금친 부분에 채워진 페라이트 재료의 비 유전율이며, ϵ_0 는 진공의 유전율이다.

그러므로, 그림 3-(b)에서 Δz 의 두께를 가지는 구조에 대한 등가유전율 ϵ_{eq} 는 식 (15)와 같이 계산 할 수 있다.

$$\epsilon_{eq} = \frac{C^V}{\epsilon_0\Delta z} \quad (15)$$

식(14)을 식(15)에 대입하면, 그림 3와 같은 구조에 대한 등가유전율 ϵ_{eq} 는 식(16)와 같이 주어진다.

$$\epsilon_{eq} = \frac{\epsilon_r a(a-b) + ab}{b(a-b)} \quad (16)$$

또한, 그림2 에서 L을 자기 인덕턴스라고 하면, ga구역을 자르는 자속은 식(17)로 주어진다.

$$\Phi = B_y g a \quad (17)$$

그리고, 자속 밀도 B_y 는 식(18)과 같다.

$$WB_y = \mu I \quad (18)$$

자기 인덕턴스 L 은 식(19)와 같이 된다.

$$LI = \Phi \quad (19)$$

한편, 자기 인덕턴스 L 은

$$L \frac{dI}{dt} = \frac{d\Phi}{dt} \quad (20)$$

이므로, 식(17)~식(20)로 부터 단위길이당 인덕턴스 (L/a)는 식(21)과 같이 계산 할 수 있다.

$$\frac{L}{a} = \frac{g\mu}{W} \quad (21)$$

그림 3 (b)를 이용하여 그림5와 같이 수평편파의 합성 인덕턴스 모델을 만들수 있으며, 수평편파의 합성 인덕턴스 L^V 은 식(21)을 확장하여 식(22)과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} L^V &= L_1 + L_2 \\ &= \frac{(a-b)\mu_0\Delta z + \mu_0\mu_r b\Delta z}{a} \end{aligned} \quad (22)$$

$$L_1 = \frac{\mu_0\mu_r b}{a}$$

$$L_2 = \frac{(a-b)\mu_0}{a}$$

여기서, μ_r 은 그림2의 빗금친 부분에 채워진 페라이트 재료의 비투자율이며, μ_0 는 진공의 투자율이다. 따라서, 그림 2에서 Δz 의 두께를 가지는 구조에 대한 등가유전율 μ_{eq} 는 식(23)와 같이 계산 할 수 있다.

$$\mu_{eq} = \frac{L^V}{\mu_0\Delta z} \quad (23)$$

식(22)을 식(23)에 대입하면 그림 2와 같은 구조에 대한 등가투자율 μ_{eq} 는 식(24)과 같이 주어진다.

$$\mu_{eq} = \frac{(a-b) + \mu_r b}{a} \quad (24)$$

위 와 같은 방법을 등가재료정수법이라 한다. 이 경우, 장의 프링징효과(field fringing)를 무시 하였는데 만약, 재료정수가 다르면 이는 무시 할 수 없는 양이 된다.

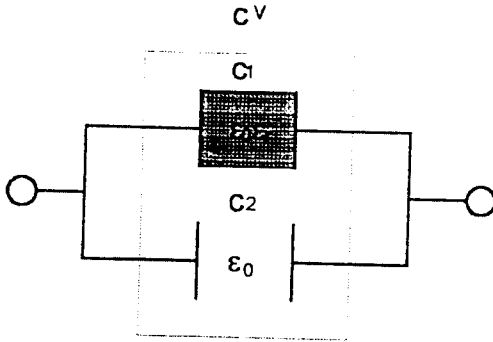


그림 6. 수직편파의 합성 용량 모델
Fig. 6 A Synthesized Capacitance Model for Horizontal Polarized Wave.

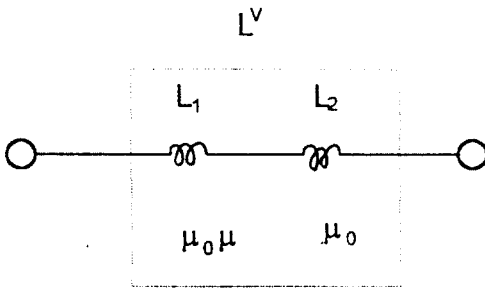


그림 7. 수직편파의 합성 인덕턴스 모델
Fig. 7 A Synthesized Inductance Model for Horizontal Polarized Wave.

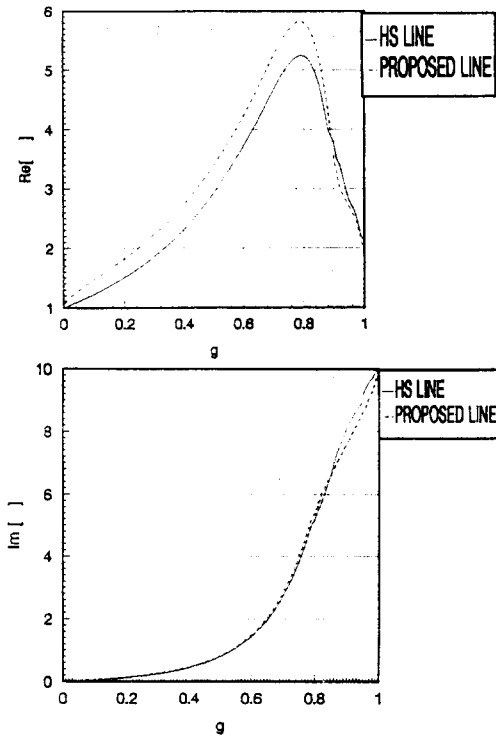


그림 8. 제안한 모델의 등가재료 정수와 HS 하한치 비교

$$\epsilon_r = (2 - j10)\epsilon_0$$

Fig. 8 Comparison H-S Lower Bounds With Equivalent Material Constant of Proposed Model.

$$\epsilon_r = \epsilon_0(2 - j10)$$

integral-equation-based moment methods와 finite-different time-domain method를 이용하여 흡수체 근처에서 전자장을 계산하는 직접적인 방법은 임의의 주파수에서 상당한 정확도를 나타내지만, 연산량이 매우 많고 흡수체 설계에 큰역활을 하지 못한다. 그러므로, 흡수체와 전자파의 상호 관계를 해석하기 위해 근사적인 방법이 사용되는데, 이것이 Hashin-Shtrikman(HS) bounds이다[9][10]. 최악의 경우, Hashin-Shtrikman(HS)의 하한치는 약 4%의 오차를 가지는 것으로 알려져 있다 [5][9][13].

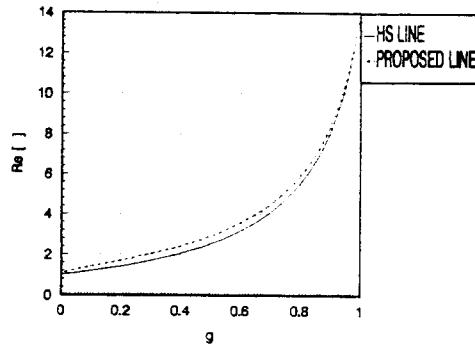


그림 9. 제안한 모델의 등가재료 정수와 HS하한치 비교

$$\epsilon_r = (14 - j0)\epsilon_0$$

Fig. 9 Comparison H-S Lower Bounds With Equivalent Material Constant of Proposed Model.

$$\epsilon_r = \epsilon_0(14 - j0)$$

$$\epsilon_r = \epsilon_0 \left(1 + g \frac{2(\epsilon_r - \epsilon_0)}{(1+g)\epsilon_0 + (1+g)\epsilon_r} \right) \quad (25)$$

여기서, $g = b^2/a^2$ 는 페라이트가 차지하는 체적비를 나타낸다.

제안된 등가재료정수법의 정확도를 평가하기 위해 유전체와 자성체에 대한 Hashin-Shtrikman (HS)값과 등가유전율 ϵ_{eq} 와 등가투자율 μ_{eq} 를 비교하였다. 등가재료정수는 그림8-9에서 보는 것처럼 HS하한치와 거의 일치하고 있다. 또한, 앞서 설명한 등가재료정수법에 의한 격자형 페라이트흡수체의 주파수 특성 값도 이와 잘 일치하고 있다[1]. 그러므로, 이러한 방법을 이용하여 흡수체의 형상과 구성성분을 알면 실제적인 특성을 예상할 수 있다.

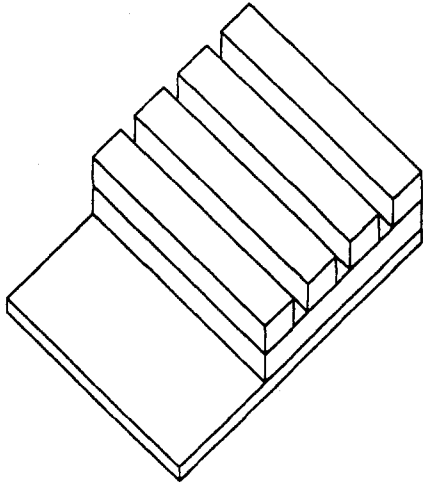


그림 10. 제안한 광대역 전파흡수체의 모양
 Fig. 10 The Typical Shape of a Wide-band Ferrite Electromagnetic Wave Absorber Proposed In This Paper.

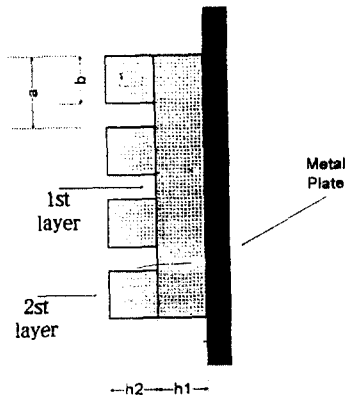


그림 11. 그림10의 단면도
 Fig. 11 Cross Section of Fig.10.

III. 광대역 전파흡수체의 설계

그림12와 같은 구조를 가지는 전파흡수체에 평면파가 수직으로 입사한 경우 제 n층의 표면에서

의 입력임피던스 Z_n 은 식(26)과 같다.

$$Z_n = Z_{cn} \frac{Z_{n-1} + Z_{cn} \tanh \gamma_n d_n}{Z_{cn} + Z_{n-1} \tanh \gamma_n d_n} \quad (26)$$

여기서,

- d_n : 제 n층의 두께
- μ_m : 제 n층의 비투자율
- ϵ_m : 제 n층의 비유전율
- Z_{cn} : 제 n층의 특성임피던스
- γ_n : 제 n층의 전파정수

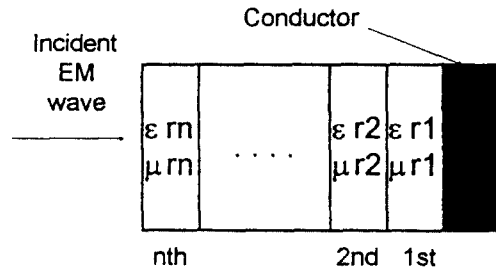


그림 12. 다층형 전파흡수체의 구조
 Fig. 12 A Multi-layered Electromagnetic Absorber.

한편 각층의 특성임피던스 Z_n 와 전파정수 γ_n 은 식 (27) 및 식(28)로 나타낼 수 있다.

$$Z_{cn} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \sqrt{\frac{\mu_m}{\epsilon_m}} \quad (27)$$

$$\gamma_n = j\omega\sqrt{\mu\epsilon} = j\omega\sqrt{\mu_0\epsilon_0}\sqrt{\mu_m\epsilon_m} \quad (28)$$

그림12에서 N=1일 때, Z_{n-1} 은 금속판의 임피던스를 의미하므로 0이다. 따라서 이 흡수체 전면에서의 반사 계수는 식(29)과 같이된다.

$$S_N = \frac{Z_{n-1}}{Z_{n+1}} \quad (29)$$

그림 10은 본 논문에서 제안한 광대역 전파흡수체의 외양이다. 제안한 전파흡수체는 페라이트 물질만으로 구성되어 있으며, 전파흡수체의 전형적인 형상은 그림 10와 같고, 단면도는 그림 11 과 같다.

각 층의 실효 유전율과 투자율을 등가재료정수법을 이용하여 구할 수 있다. 한편, 페라이트 투자율의 주파수 분산식은 식 (30)과 같다[14]-[16].

$$\mu_r = 1 + \frac{K}{1 + j \frac{f}{f_m}} \quad (30)$$

여기서, K는 직류(DC)시의 비투자율,
f는 사용 주파수,
fm은 완화 주파수이다.

여기서 사용된 소결 페라이트는 K=2500, fm=2.5MHZ, 그리고 εr=14.0가 된다. 따라서 제 2층의 페라이트 자성체부, 공기부 및 FIN부의 비율을 조절하여 투자율 및 유전율을 제어할 수 있으므로 광대역화 페라이트전파흡수체의 설계가 가능하다.

허용반사계수를 |S0| 라고 했을 때, Sn ≤ |S0|을 조건으로 하여 최소의 두께로 최대의 주파수대역폭을 가지는 페라이트흡수체를 설계한다. 즉, 전체 두께를 최소로 하며 -20dB 이상의 전파흡수능을 가지는 주파수대역폭이 최대가 되도록 각층의 두께 및 제 2층의 형상을 결정한다. 전파흡수체의 공간적 모양을 변형시키는 기술을 이용하여 유전율과 투자율을 제어 할 수 있기 때문에 광대역 전파흡수체를 설계 할 수 있다.

IV. 결 과

각 층의 두께와 편형 페라이트전파흡수체의 치수를 표1과 같이 선택함으로써, 수평편파의 경우 최저 30MHZ에서 최고 3,530MHZ까지 반사감쇠량이 -20dB를 만족하는 흡수체를 설계 할 수 있었고, 수직편파의 경우 최저 30MHZ에서 최고 130MHZ까지 반사감쇠량이 -20dB를 만족하는 흡수체를 설계할 수 있었다.

그림13은 Fin형 광대역 페라이트 전파흡수체의 주파수에 따른 반사특성을 보이고 있다. 그림13에서 알수 있듯이, 반사손실 -20dB이하 라는 규정치를 만족하는 주파수영역은 30~3530MHZ까지로, 이는 단층 타일형 페라이트흡수체와 격자형 페라이트흡수체와 비교하여 매우 넓은 대역을 가진다.

본 논문에서 제안한 흡수체는 수평편파용 전파흡수체로 수직편파인 경우는 단층 타일형 페라이트흡수체보다 주파수특성이 낮음을 알 수 있었다.

표 1. 제안한 편형 전파흡수체의 치수
Table. 1. The Dimensions of Proposed FIN-Type Absorber.

a) 수평편파
a) Horizontal Polarized Wave

	치수(mm)	-20 dB 의 흡수능 대역폭
주 기 (a=)	16.0	30 - 3530 MHz
페라이트의 폭 (=b)	8.4	
타일 페라이트의 두께(=t1)	22	
핀 페라이트의 두께(=t2)	22	

b) 수직편파
b) Vertical Polarized Wave

	치수(mm)	-20 dB 의 흡수능 대역폭
주 기 (a=)	14.8	30 - 130 MHz
페라이트의 폭 (=b)	9.9	
타일 페라이트의 두께(=t1)	4	
핀 페라이트의 두께(=t2)	4	

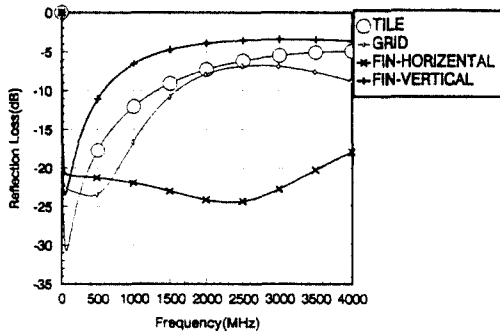


그림 13. 기존의 페라이트 전파흡수체와 제안한 광대역 전파흡수체의 주파수특성 비교
 Fig. 13 Comparison Conventional Absorbers With Proposed Absorber for Frequency Characteristic.

V. 결 론

페라이트 전파흡수체를 단일편파용으로 광대역화 하기 위하여 기존의 타일형 페라이트 전파흡수체에 핀 페라이트를 접합시킨 2층 구조의 전파흡수체를 고안하고 등가복소유전율과 투자율을 계산하여 흡수특성을 평가 하여, 제한한 등가재료정수가 Hashin-Shtrikman(HS)의 하한치와 잘 일치함을 알 수 있었다.

그 결과 수직편파에 대해서는 30MHz에서 130MHz까지 -20dB 이하의 반사 손실을, 수평편파에 대해서는 30MHz에서 3530MHz까지 -20dB 이하의 반사 손실을 가지는 광대역 전파흡수체를 설계하였다. 이는 종전의 30MHz에서 780MHz의 대역폭을 가지는 격자형 페라이트흡수체에 비하여 획기적으로 광대역화할 수 있었다. 이 전파흡수체는 2층 구조이지만 하나의 금형으로 성형할 수 있는 일체형 이므로 실용성이 높아, TV고스트 방지용, 전자파장해 대책용 벽재 등으로 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

References

[1] Y. Naito et al. , "Design of the grid type

ferrite electromagnetic wave absorber," EMCJ 91-81, IEICE of Japan, pp.21-28, Jan. 1992.

[2] Y. Shimizu et al. , Absorption and shield of electromagnetic wave, Nikkei Publishing Co., Japan, 1989.

[3] E. Bensoussan, J. L. Lions and G. Pananicolau, Asymptotic Analysis for Periodic Structures. Amsterdam : North-Holland, 1978.

[4] N. S. Bakhvalov and G. Panasenko, Homogenization : Averaging Processes in Periodic Media : Mathematical Problems in the Mechanics of Composite Materials. Kluwer Academic Publishers, 1989.

[5] E. F. Kuester and C. L. Holloway, "A low-frequency model for wedge or pyramid absorber arrays - I : Theory", IEEE Trans. on Electromagnetic compatibility, vol. 36, no. 4, Nov. 1994.

[6] C. L. Holloway and E. F. Kuester, "A low-frequency model for wedge or pyramid absorber arrays - II : Theory", IEEE Trans. on Electromagnetic compatibility, vol. 36, no. 4, Nov. 1994.

[7] E. F. Kuester and C. L. Holloway, "Improved low-frequency performance of pyramid-cone absorbers for application in semi-anechoic chambers", IEEE National Symposium on Electromagnetic Compatibility, Denver, CO, May 23-25, pp. 394-399. 1989.

[8] H. Takahashi, Waves I, Maruzen Publishing Co. , Tokyo, Japan, 1973.

[9] E. F. Kuester and C. L. Holloway, "Comparison of approximations for effective parameters of artificial dielectrics", IEEE Trans. Microwave Theory and Tech., vol. 38, no. 11, pp. 1752-1755, Nov. 1990.

[10] J. I. Jackson and S. R. Coriell, "Transport coefficients of composit materials", J. Appl.

- Phys., vol. 39, pp. 2349-2354, 1968.
- [11] S. R. Coriell and J. I. Jackson, "Bounds on transport coefficients of two-phase materials", J. Appl. Phys., vol. 39, pp. 4733-4736, 1968.
- [12] G. N. Duner, "Thermal conductivity of mixtures with interpenetrating components", J. Engr. Phys., vol. 19, no. 3, pp. 1195-1206, Sept. 1970.
- [13] Z. Hashin and S. Shtrikman, "A variational approach to the theory of the effective magnetic permeability of multiphase materials", J. Appl. Phys., vol. 33, pp. 3125-3131, 1962.
- [14] Y. Naito, "Formulation of frequency dispersion of ferrite permeability", IECE of Japan, Vol. J59-C, No. 5, pp. 297-304, May 1976.
- [15] Y. Naito, Electromagnetic wave absorber, OHM Publishing Co., Japan, 1987.
- [16] P. A. Chatterton and M. A. Houlden, EMC - Electromagnetic theory to practical design, Chapter 3, John Wiley & Sons Ltd, 1992.