

십자형 슬롯을 가지는 적층형 초광대역 페라이트 전파흡수체의 설계

Design of Super Wide-Band Electromagnetic Wave Absorbers Using Cross-Slotted Ferrite in the Double-Layered Type

김 동 일* · 전 상 업**

Dong Il Kim* · Sang Yup Jun**

요 약

초광대역 주파수 특성을 가지며, 제2층에 십자형 슬롯을 가지는 2층형 전파흡수체의 광대역 설계법을 제안하였다. 이와 같은 광대역 전파흡수체는 등가재료정수법을 적용한 이론 모델을 이용하여 설계할 수 있다. 제안한 모델을 바탕으로 30MHz~3,170MHz의 주파수 범위에서 우수한 반사감쇠 특성을 가지는 초광대역 전파흡수체를 설계하였다.

Abstract

A wide-band design method of double layered electromagnetic wave absorbers cross-slotted in the second layer(which has very wide band frequency characteristics) is proposed and discussed. The wide-band electromagnetic wave absorber can be designed under some approximations by the theoretical model using the equivalent material constants method applied to the second layer.

Based on the developed model, wide-band electromagnetic wave absorbers with excellent reflectivity characteristics in the frequency range of 30MHz to 3,170MHz were designed.

I. 서 론

최근 사무자동화, 공장자동화 등으로 인해 전파의 이용이 대폭적으로 증대됨에 따라 EMI (Electromagnetic Interference)가 심각한 문제로 대두되고 있다.

EMI 및 EMC(Electromagnetic Compatibility)대책을 위하여 다양한 전파흡수체가 개발되어

이용되고 있으나, 사용할 수 있는 주파수대역이 좁거나 치수가 과대하여 유효공간의 확보가 어려운 문제점 등이 있다.

종래부터 TV Ghost 방지용으로 사용되어 오고 있는 타일형 페라이트 전파흡수체는 -20 dB 이상의 전파흡수능을 가지는 주파수대역이 30MHz~400MHz 정도로 제한적이므로, ANSI C63.4-1991, CISPR A SEC.109 또는 IEC 801-3 등의 규격에서 요구하는 주파수대역 30MHz~1,000MHz

* 한국해양대학교 전파공학과

** 한국해기연수원

「이 연구는 1995년도 한국과학재단 핵심연구지원과제에 의한 연구 결과임.」

· 논문번호 : 96-4-042

· 접수일자 : 1996년 9월 6일

나 30MHz~3,000MHz에서 -20 dB 이상의 전파 흡수능을 만족시키기에는 부족하다. 또한, 격자형 전파흡수체는 30MHz~ 870MHz 정도로 대역폭이 넓어졌으나 상기 규격기준을 만족시키기에는 역시 미흡하다[1],[2].

한편, 30MHz 이상의 넓은 주파수대역을 cover 하기 위하여 pyramid형 전파흡수체가 이용되고 있으나 그 치수가 커 높이가 약 3.7m나 되기 때문에 전파흡수체가 차지하는 무효공간이 과대해지는 문제점과 경년변화에 따른 전파흡수능의 열화 등과 같은 문제점을 가지고 있다[1]~[5].

따라서, 이러한 문제점을 해결하기 위해 두께 5cm 미만으로 30MHz~3,000MHz의 광대역 주파수대에 걸쳐 99% 이상의 전파를 흡수할 수 있는 전파흡수체의 개발이 절실히 요망된다.

그러나 Ferrite만으로 전파흡수체를 구성하는 경우, 특정 Ferrite가 전파흡수체용으로 주어지면 그 복소유전율 및 복소투자율은 일정한 주파수분산 특성을 가지므로 평판 형상으로 전파흡수체를 구성한다면 그 전파흡수 특성에는 한계가 있다. 이 경우 설계 Parameter도 두께 제어에 불과하므로 통상 타일형 전파흡수체는 아무리 적절한 Ferrite를 선정한다고 하더라도 주파수대역이 30MHz~450MHz 정도로 제한된다. 또, 재료정수가 다른 몇 개의 페라이트 층을 적층하여 전파흡수체를 구성하는 경우에도 현재의 재료기술로 각층의 복소유전율 및 복소투자율을 원하는 대로 제어하는 것이 불가능하므로 두께가 얇으며 광대역 특성을 가지는 전파흡수체를 실현하는 것은 용이하지 않다[4]~[7].

따라서, 이 연구에서는 전파흡수체의 공간적인 형상을 변화시켜 Ferrite의 유효 복소유전율 및 복소투자율을 제어함으로써 그 한계를 극복하고자 한다. 즉, 종래의 평판상 자성체로 구성된 전파흡수체를 광대역화 하기 위하여 임의의 형상을 가지는 페라이트 자성체 층을 조합한 구조를 구상하고, 제1층에 타일형 소결페라이트 층을 배치하고 제2층에 슬롯(Slot)부를 가지는 페라이트 층을 적층한 2층 구조의 페라이트 전파흡수체를 설계한다.

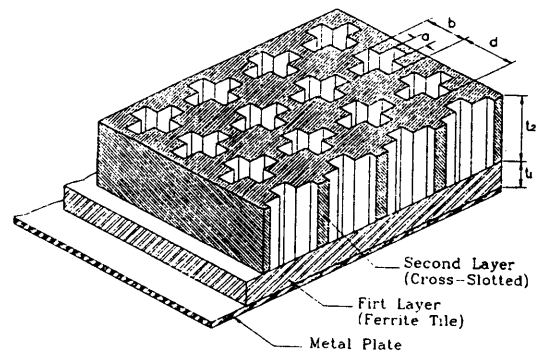
II. 제2층에 십자형 Slot을 가지는 광대역 전파흡수체의 설계

[그림 1]과 같이 뒷면에 금속판이 취부된 타일형 페라이트 전파흡수체위에 Slot부를 가지는 페라이트 자성체를 적층한 2층 구조로 되어 있다. 제2층의 구조는 등가재료정수를 변화시키기 위하여 페라이트 자성체부와 공기부가 연속해서 동일면상에 반복하도록 되어 있다.

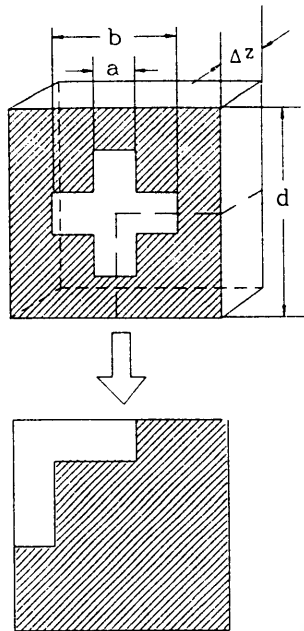
즉, 제2층은 Slot부가 주기적으로 배열되어 있으며 그 주기가 입사전파의 파장에 비해 짧으므로 균질화이론에 따라 유효 등가재료로 근사할 수 있다 [8]~[10].

페라이트 자성체 부에 적당한 폭의 Slot을 개재시켜 그 층중에 공존하는 페라이트 자성체 부, Slot인 공기 부의 상호관계에 의해 그 층을 들여다 보는 투자율 및 유전율을 다층 구조의 전파흡수체를 구성할 때 요구되는 설정치로 제어하는 구조로 되어 있다.

이 경우, 십자형 Slot을 가지는 제2층 역시 제1층과 동일한 재료의 페라이트를 사용하므로 하나의 금형으로 성형이 가능하면서도 등가적인 유전율 및 투자율이 다른 두 층을 적층한 것과 같은 효과를 얻게 된다.



[그림 1] Cross-slotted 페라이트 전파흡수체
[Fig. 1] Cross-slotted ferrite absorber.

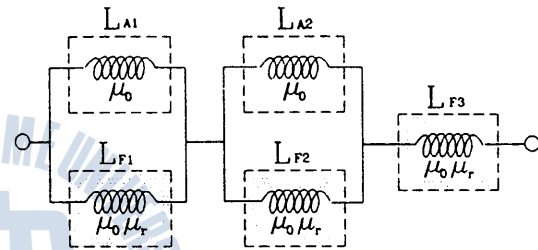


[그림 2] 등가재료정수 모델
[Fig. 2] A model for the calculation of equivalent material constants.

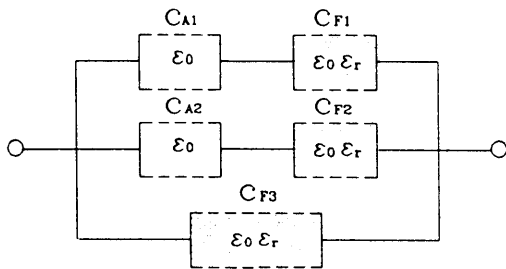
등가 재료정수 모델을 이용하여 구한다.

[그림 2]를 이용하여 [그림 3]과 같은 합성용량 모델을 만들 수 있으며, 총 합성용량 C 는 식 (1)과 같이 계산할 수 있다.

$$C = \epsilon_0 \Delta z \left\{ \frac{\epsilon_r a}{d - b + \epsilon_r b} + \frac{\epsilon_r (b - a)}{d - a + \epsilon_r b} + \frac{\epsilon_r (d - b)}{d} \right\} \quad (1)$$



[그림 4] 합성인덕턴스 모델
[Fig. 4] A synthesized inductance model.



[그림 3] 합성용량 모델
[Fig. 3] A synthesized capacitance model.

여기서, ϵ_r 은 [그림 2]의 빗금친 부분에 채워진 페라이트의 비유전율이며, ϵ_0 는 진공의 유전율이다. 따라서 [그림 2]에서 Δz 의 두께를 가지는 구조에 대한 등가유전율 ϵ_{eq} 는 식 (2)와 같이 계산할 수 있다.

$$\epsilon_{eq} = \frac{C}{\epsilon_0 \Delta z} \quad (2)$$

공간적으로 형상이 변하는 제2층의 특성은 등가 재료 정수법을 이용하여 해석한다[1],[6],[9].

[그림 1]과 같은 구조를 가지는 전파흡수체의 등가유전율 및 등가투자율은 [그림 2]와 같이 제안한

식 (1)을 식 (2)에 대입하면, [그림 2]와 같은 구조에 대한 등가유전율 ϵ_{eq} 는 식 (3)과 같이 주어진다.

$$\epsilon_{eq} = \epsilon_0 \Delta z \left\{ \frac{\epsilon_r a}{d - b + \epsilon_r b} + \frac{\epsilon_r (b - a)}{d - a + \epsilon_r b} \right.$$

$$+ \frac{d-b}{d} \} \quad (3)$$

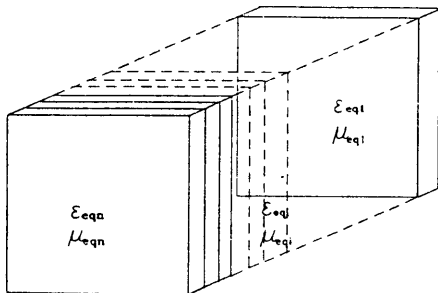
한편, [그림 2]를 이용하여 상기와 같은 방법으로 [그림 4]와 같은 합성인덕턴스 모델을 만들 수 있으며, 합성인덕턴스 L 은 식 (4)와 같이 구할 수 있다.

$$L = \mu_0 \Delta z \left\{ \frac{\mu_r a}{d-b+\mu_r b} + \frac{\mu_r (b-a)}{d-a+\mu_r a} + \frac{\mu_r (d-b)}{d} \right\} \quad (4)$$

여기서, μ_r 은 [그림 2]의 빗금친 부분에 채워진 페라이트의 비투자율이며, μ_0 는 진공의 투자율이다. 따라서 [그림 2]에서 Δz 의 두께를 가지는 구조에 대한 등가투자율 μ_{eq} 는 식 (5)와 같이 계산할 수 있다.

$$\mu_{eq} = \frac{L}{\mu_0 \Delta z} \quad (5)$$

식 (4)를 식 (5)에 대입하면 [그림 2]와 같은 구



[그림 5] 다층형 전파흡수체의 구조
[Fig. 5] Multi-layered asymptotic structure.

조에 대한 등가투자율 μ_{eq} 는 식 (6)과 같이 주어진다.

$$\mu_{eq} = \mu_r \left\{ \frac{a}{d-b+\mu_r b} + \frac{b-a}{d-a+\mu_r b} + \frac{d-b}{d} \right\} \quad (6)$$

한편, [그림 5]와 같은 구조를 가지는 전파흡수체에 평면파가 수직으로 입사한 경우, 제 n 층의 표면에서의 입력임피던스 Z_n 은 식 (7)과 같다.

$$Z_n = Z_{cn} \frac{Z_n - 1 + Z_{cn} \tanh \gamma_n d_n}{Z_{cn} + Z_n - 1 \tanh \gamma_n d_n} \quad (7)$$

여기서, d_n : 제 n 층 두께, μ_{rn} : 제 n 층 비투자율, ϵ_{rn} : 제 n 층 비유전율, Z_{cn} : 제 n 층 특성 임피던스, γ_n : 제 n 층의 전파정수이다.

그리고 각층의 특성임피던스(Z_{cn})와 전파정수(γ_n)는 식 (8) 및 식 (9)로 나타낼 수 있다.

$$Z_{cn} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \sqrt{\frac{\mu_m}{\epsilon_m}} \quad (8)$$

$$\gamma_n = j\omega \sqrt{\mu\epsilon} = j\omega \sqrt{\mu_0\epsilon_0} \sqrt{\mu_m\epsilon_m} \quad (9)$$

[그림 5]에서 $n=1$ 일 때, Z_{n-1} 은 금속판의 임피던스를 의미하므로 0이다. 따라서, 이 흡수체 전면에서의 반사계수는 식 (10)과 같이 된다.

$$S_n = \frac{Z_n - 1}{Z_n + 1} \quad (10)$$

한편, 전파흡수체로 cover하려고 하는 대상주파수대역에서 페라이트 투자율(μ_{rn})의 주파수 분사식은 식 (11)의 실험식이 실측치와 잘 일치하므로 이를 사용하였다[7],[11].

$$\mu = 1 + \frac{K}{(1 + j \frac{f}{f_m})} \quad (11)$$

여기서 K 는 직류(DC)시의 비투자율이며, f 는 사용 주파수 그리고 f_m 은 완화주파수이다.

따라서, 제2층의 페라이트 자성체 부, 공기 부인 Slot부의 비율을 조절하여 투자율 및 유전율을 제어할 수 있으므로 광대역 특성을 가지는 페라이트 전파흡수체의 설계가 가능하다.

III. 전파흡수 특성 평가 결과

초투자율 2000, 2500 및 3000인 높은 투자율을 가지는 Ni-Zn계 페라이트를 사용하여 전체 두께를 최소로 하며 -20 dB 이상의 전파흡수능을 가지는 주파수대역폭이 최대가 되도록 각층의 두께 t_1 , t_2 및 제 2층의 형상 a , b , d 를 결정하였다[12],[13].

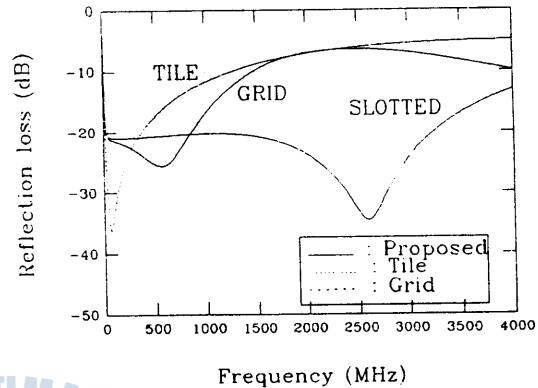
최적 형상에 대한 전파흡수체의 치수 및 흡수 특

<표 1> 고투자율을 가지는 Ni-Zn 페라이트로 구성된 광대역 전파흡수체의 전파흡수 특성결과

Case	Measured material constant parameters	Absorber dimension(mm)					Band-width with the limits of -20 dB
		t_1	t_2	a	b	d	
1	$\epsilon_r=14.0$ $K=2,000$ $f_m=3.1\text{MHz}$	5.7	15.6	7.4	19	20	30~3,140 MHz
2	$\epsilon_r=14.0$ $K=2,500$ $f_m=2.5\text{MHz}$	5.6	15.5	7.4	19	20	30~3,170 MHz
3	$\epsilon_r=14.0$ $K=3,000$ $f_m=2.1\text{MHz}$	5.6	15.2	7.4	19	20	30~3,240 MHz

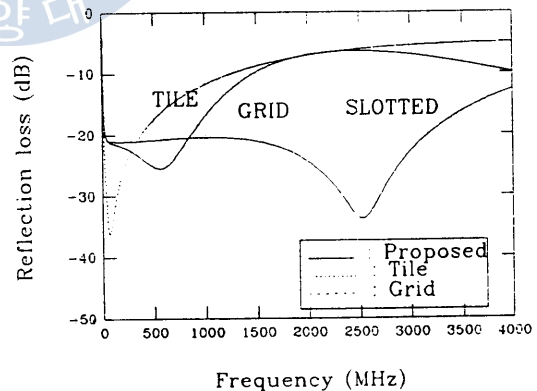
성은 <표 1>과 같다.

[그림 6], [그림 7] 및 [그림 8]은 각각 Case-1, Case-2 및 Case-3의 재료를 사용한 경우 설계한



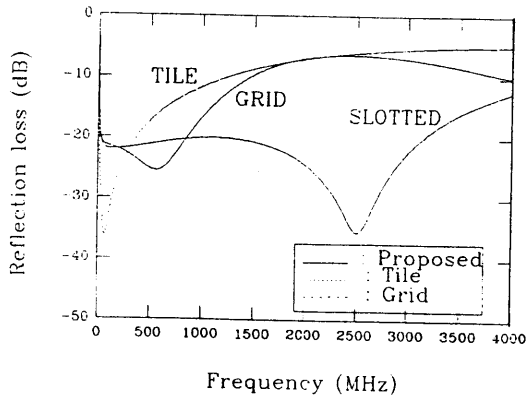
[그림 6] Case-1(표 1)의 전파흡수체에 대한 반사주파수 특성

[Fig. 6] Reflectivity frequency characteristics of the designed wide band electromagnetic wave absorber of the case-1 in table 1.



[그림 7] Case-2(표 1)의 전파흡수체에 대한 반사주파수 특성

[Fig. 7] Reflectivity frequency characteristics of the designed wide band electromagnetic wave absorber of the case-2 in table 1.



[그림 8] Case-3(표 1)의 전파흡수체에 대한 반사주파수 특성

[Fig. 8] Reflectivity frequency characteristics of the designed wide band electromagnetic wave absorber of the case-3 in table 1.

페라이트 전파흡수체의 반사주파수 특성을 나타내고 있으며, 기존 타일형 페라이트 전파흡수체와 격자형 페라이트 전파흡수체의 특성을 동시에 한 그래프에 나타내어 상호 비교하였다.

그림에서 고안한 전파흡수체는 -20 dB 이하의 반사감쇠량을 가지는 주파수범위가 매우 넓은 광대역 특성을 가지며, 기존 타일형 및 격자형 페라이트 전파흡수체에 비해 그 특성이 매우 뛰어난 것을 알 수 있다.

IV. 결 론

페라이트 전파흡수체를 광대역화하기 위하여 기존 타일형 페라이트 전파흡수체와 Slot을 가지는 페라이트 자성체를 적층한 2층 구조의 전파흡수체를 고안하고 그 흡수 특성을 평가하였다.

그 결과 30MHz에서 약 3GHz의 주파수 범위에서 -20 dB 이하의 반사감쇠량을 가지는 우수한 특성을 보였으며, 이는 기존의 타일형 페라이트 전파흡수체 및 격자형 전파흡수체의 주파수대역이 각각 30MHz에서 370MHz 및 870MHz인 것에 비해 광

목할 만한 것이다.

또한, 이 전파흡수체는 2층 구조이나 하나의 금형으로 성형할 수 있는 일체형이므로 실용성이 높아서, 전파암실용, GTEM-cell 및 EMC대책용으로 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] Dong Il Kim et al., "Electromagnetic wave absorber with wide-band frequency characteristics using exponentially tapered ferrite," *IEEE Transactions on electromagnetic compatibility*, vol. 38, no. 2, May, 1996.
- [2] Y. Naito, "Recent topics of electromagnetic wave absorber for EMI and EMC," *MW92-67, IEICE of Japan*, pp. 67-74, Jul., 1992.
- [3] Y. Naito et al., "Design of the grid type ferrite electromagnetic wave absorber," *EMCJ 91-81, IEICE of Japan*, pp. 21-28, Jan., 1992.
- [4] Y. Shimizu et al., *Absorption and shield of electromagnetic wave*, Nikkei Publishing Co., Japan, 1989.
- [5] Y. Naito et al., "Characteristics of grid ferrite electromagnetic wave absorber," *IEICE of Japan*, vol. J76-B-II, no. 11, pp. 898-905, Nov., 1993.
- [6] H. Takahashi, *Waves I*, Maruzen Publishing Co., Tokyo, Japan, 1973.
- [7] Y. Natio, "Formulation of frequency dispersion of ferrite permeability," *IEICE of Japan*, vol. J59-C, no. 5, pp. 297-304, May, 1976.
- [8] E. Bensoussan, J. L. Lions and G. Pananicolau, *Asymptotic Analysis for Periodic Structures*. Amsterdam: North-Holland,

- 1978.
- [9] 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.
- [10] C. L. Holloway and E. F. Kuester, "A low-frequency model for wedge or pyramid absorber arrays- II : Computed and measured results," *IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility*, vol. 36, no. 4, Nov., 1994.
- [11] Takashi Morita et al., "Analysis of ferrite absorber considering hysteresis and relaxation characteristics by spatial network method," *IEICE of Japan*, vol. J73-B-II, no. 9, pp. 464-471, Sep., 1990.
- [12] Y. Natio, *Electromagnetic wave absorber*, OHM Publishing Co., Japan, 1987.
- [13] P. A. Chatterton and M. A. Houlden, *EMC-Electromagnetic theory to practical design*, Chapter 3, John Wiley & Sons Ltd, 1992.



