

초광대역특성을 갖는 정방형 페라이트 기둥구조의 전파흡수체 설계법⁺

김 동 일* · 전 상 엽** · 이 창 우** · 정 세 모***

Design of Broadband Electromagnetic Wave Absorber with Square
Ferrite Cylinders in the Second Layer

Dong Il Kim · Sang-Yup Jun** · Chang-Woo Lee** · Se-Mo Jung****

< 목 차 >

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

Abstract

A wide band design method of an electromagnetic wave absorber with square ferrite cylinders 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 also evaluated and proposed for its accuracy by comparison with Hashin-Shtrikman formulas.

Based on the developed model, wide band electromagnetic wave absorbers with excellent reflective frequency characteristics in the frequency range of 30MHz to 3,690MHz were designed.

I. 서 론

최근의 전자파 장애는 공장자동화, 사무자동화 등

에 따른 심각한 문제로 야기되고 있다. 따라서 EMI 또는 EMI의 대책의 일환으로 전파흡수체가 응용분야에 따라 사용되고 있다. 이러한 전파흡수체는

+ 이 연구는 1994년도 산학협동재단의 학술연구비(Matching Fund : 삼화전자공업주식회사)지원에 의한 연구 결과임.

* 한국해양대학교 전파공학과

** 한국해양대학교 대학원

*** 한국해양대학교 해사수송과학과

실제사용에 있어서 사용주파수의 대역폭이 광대역이어야 하고, 두께도 얇아야 하며 경량화도 만족되어야 한다. 오늘날 전파흡수체가 사용되는 주된 목표중의 하나는 전자기기 등에서 방사되는 누설전파를 점검 또는 측정하고자하는데 사용되는 전파암실용으로 만드는 것이다. ANSI C63.4-1991, CISPR A SEC.109, 또는 IEC 801-3 등에서 규정하는 조건을 만족하기 위해서는 전파암실용으로 사용가능한 주파수범위가 30~1000MHz 또는 3GHz 이상을 만족하여야 한다.

현재로는 sintered ferrite tiles 로 구성된 단층형 페라이트 흡수체는 반사계수가 허용치 -20dB 안에서 30~400MHz 정도를 cover하고 있으며 격자형 페라이트 전파흡수체의 대역폭은 30~780MHz의 대역을 cover 하고 있다[1][2]. 상기의 전파흡수체로는 국제규격에서 요구하는 전파암실용으로 만족되지 못한다. 본 논문에서는 이러한 조건을 충족시키기위하여 sintered ferrite tile과 2층에 정방형 페라이트 기둥모양을 주기적으로 배열한 광대역 전파흡수체를 설계하였다.

주기적인 배열된 정방형 페라이트 기둥의 전파흡수체를 분석하는데 있어서 페라이트의 유전율과 투자율의 등가재료정수를 사용한 이론적 모델을 제안하고 적용하였다. 또한 제안된 이론적 모델의 적합성을 입증하였고, 광대역 전파흡수체의 최적설계 뿐만아니라 우수한 반사감쇠특성도 입증하였다.

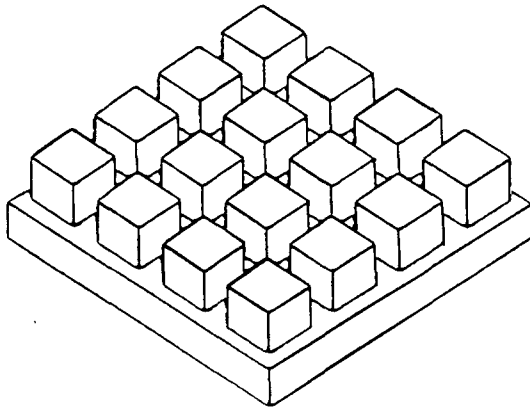


Fig. 1 A Absorber Composed of a Periodic

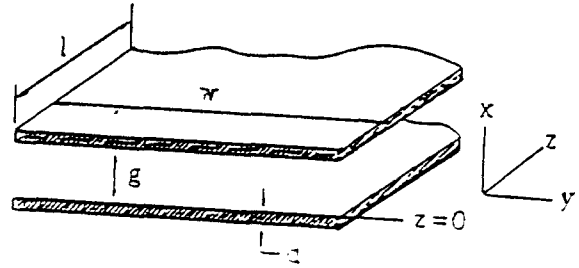


Fig. 2 A Parallel Plate Transmission Line. Array of Square Ferrite Cylinders.

II. 등가재료정수법

그림 1에서 보여주는 주기적인 구조를 해석하기 위해 균질화 이론에 의존할 수 있는데 이것은 구조의 주기가 파장보다 짧을때 효과적으로 사용할 수 있다[3]-[7].

그림 2와 같이 y 방향의 폭 W, 두 평판사이의 간격 g인 평행판 전송선에서 z방향으로 단위길이당 용량과 인덕턴스를 계산한다. 이 경우 단위길이당 용량은 [8]에 의해 식(1)과같이 나타낼 수 있다.

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

여기서 C는 평행도체판간의 총용량이며 ϵ 는 전송선로에 채워진 물질의 유전율이다. 한편, 단위길이당 인덕턴스는 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서 L은 평행도체판간의 총 합성인덕턴스이며, μ 는 전송선로에 채워진 물질의 투자율이다. 이러한 계산 방법을 이 논문에서 제안한 광대역 전파흡수체의 설계에 이용할 그림 3과 같은 모델로 확장하여 보자.

그림 3(a)에서 a는 X, Y방향의 간격이며 d는 흡수체로 채워진 부분의 폭이다. ϵ_r 과 μ_r 는 흡수체 크기의 복소유전율과 투자율이며 ϵ_0 와 μ_0 는 진공중의 유전율과 투자율이다.

그림 3(a)에서 보여주는 흡수체의 성질을 연구하기 위해 점선으로 표시된 부분을 고려하여야 하며, 이는 X,Y 방향으로 대칭이 되므로 그림 3(b)로 확대되어진다.

만일 금속판이 그림 3(b)에서와 같이 좌우에 놓여진다면 그림 4와 같은 합성 용량 모델을 만들 수 있으며 총합성 용량 C는 그림 4와 같이 C₁과 C₂처럼 직·병렬로 두고 subcell로 세분화 하여 계산하고 조합하여 구할 수 있다.

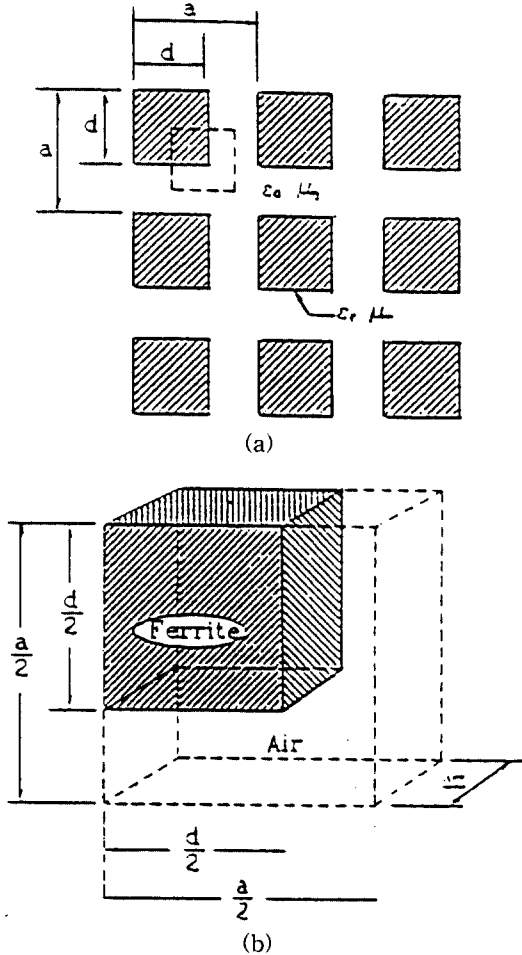


Fig. 3 (a) Parallel Array of Square Ferrite Cylinder (b) A Model for Calculation of Equivalent Material Constants.

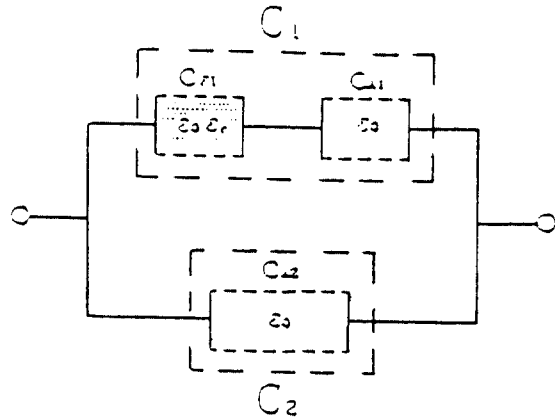


Fig. 4 A Synthesized Capacitance Model.

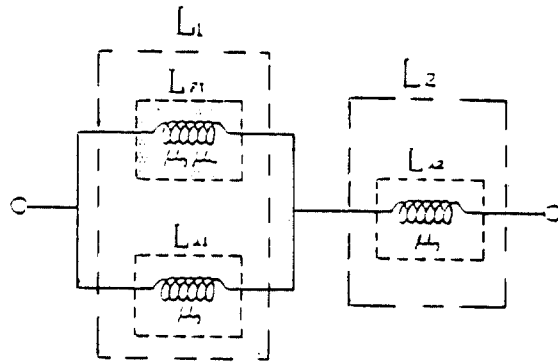


Fig. 5 A Synthesized Inductance Model.

$$C = C_1 + C_2$$

$$= \epsilon_0 \Delta z \left\{ \frac{(a-d)}{a} + \frac{\epsilon_r d}{(a-d)\epsilon_r + d} \right\} \quad (3)$$

여기서 $C_1 = \frac{C_{F1} C_{A1}}{C_{F1} + C_{A1}}$

$$C_{F1} = \epsilon_0 \epsilon_r \Delta z$$

$$C_{A1} = \frac{\epsilon_0 d \Delta z}{a - d}$$

$$C_2 = C_{A2} = \frac{\epsilon_0 (a - d) \Delta z}{a}$$

따라서 그림 3(b)에서 Δz 의 두께를 가지는 구조에 대한 등가유전율 ϵ_{eq} 는 식(4)와 같이 계산할 수 있다.

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

식(3)을 식(4)에 대입하면 등가유전율 ϵ_{eq} 는 식(5)와 같이 주어진다.

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

여기서 $g=d^2/a^2$ 는 페라이트로 채워진 공간의 체적을 의미한다. 또한 그림 2에서 L을 자기인덕턴스라고 하면 ga구역을 자르는 자속은 식(6)과 같이 주어진다.

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

그리고 자속밀도 B_y 는 식(7)과 같으며

$$W B_y = \mu I \quad (7)$$

자기 인덕턴스는 식(8)과 같이 주어진다.

$$L I = \Phi \quad (8)$$

한편, 자기인덕턴스 L은 식(9)로 정의된다.

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

식(7), 식(8) 및 식(9)로부터 단위길이당 인덕턴스 L/a 는 식(10)으로 주어진다.

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

모든 field fringing는 무시된다. 그림 3(b)을 이용하여 상기와 같은 방법으로 그림 5와 같은 합성 인덕턴스 모델을 만들수 있으며 합성 인덕턴스 L은 식(10)을 확장하여 식(11)과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} L &= L_1 + L_2 \\ &= \mu_0 \Delta z \left\{ \frac{a-d}{a} + \frac{\mu_r d}{(a-d)\mu_r + d} \right\} \end{aligned} \quad (11)$$

여기서

$$\begin{aligned} L_1 &= \frac{L_{F1} L_{A1}}{L_{F1} + L_{A1}} = \frac{\mu_0 \mu_r d \Delta z}{(a-d)\mu_r + d} \\ L_{F1} &= \mu_0 \mu_r \Delta z \\ L_{A1} &= \frac{\mu_0 d \Delta z}{a-d} \\ L_2 &= L_{A2} = \frac{\mu_0 (a-d) \Delta z}{a} \end{aligned}$$

μ_r 은 그림 3(b)의 페라이트로 채워진 비투자율이며 μ_0 는 진공중의 투자율이다. 따라서, 그림3(b)에서 처럼 Δz 의 두께를 가지는 구조에 대한 등가투자율 μ_{eq} 는 식(12)와 같이 나타낼 수 있다.

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

식(11)을 식(12)에 대입하면 구조에 대한 등가투자율 μ_{eq} 는 식(13)과 같이 주어진다.

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

상기 방법은 참조문헌 [3]-[12]에 설명되어 있으며 등가재료정수법으로 언급되어졌다. 이러한 경우에 있어서 재료정수가 전혀 다르다면 field fringing

를 무시하는 것은 큰 영향을 받게된다.

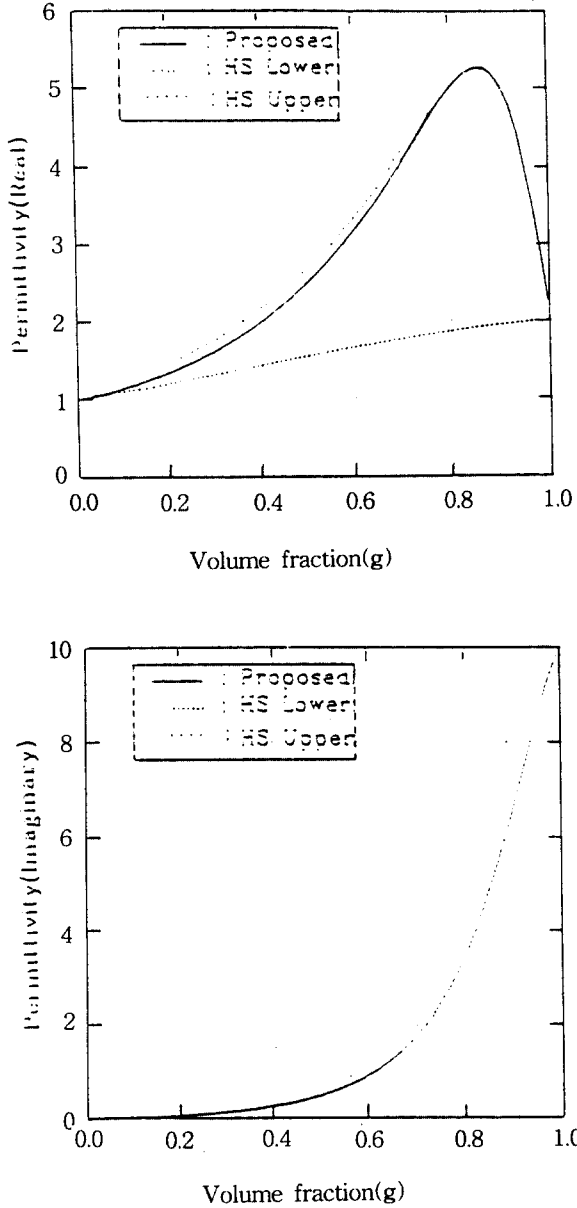


Fig. 6 Comparison of Equivalent Permittivity with HS values for $\epsilon_r=2-j10$

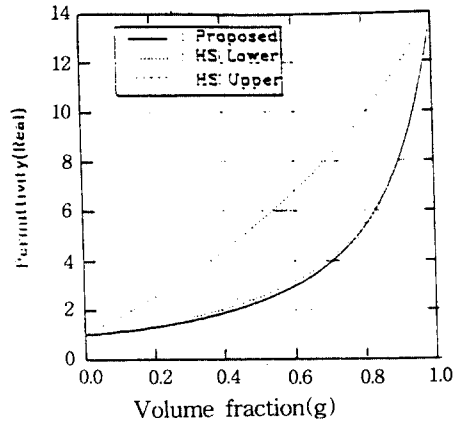


Fig. 7 Comparison of Equivalent Permittivity with HS values for $\epsilon_r=14-j0$

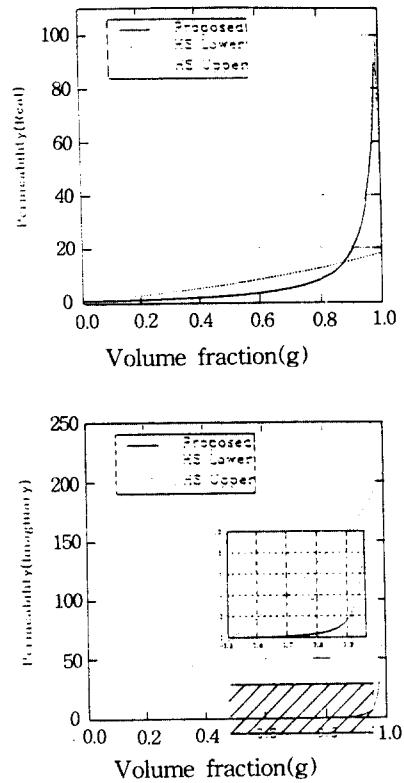


Fig. 8 Comparison of Equivalent Permeability with HS values for $K=2500, f_r=2.5\text{MHz}$ at 30MHz

적분방정식에 기초를 둔 모멘트 방법과 유한편차 time-domain 방법을 사용하는 흡수체의 주변에 형성되는 전자장을 계산하는 문제에서 직접 수식으로 접근하는 것은 임의의 주파수일때 아주 정확할 수 있다. 그러나 계산적으로 매우 민감하며 흡수체 설계에 직접적으로 나타낼 수 없다. 그래서 asymptotic 방법이 흡수체 배열을 가진 전자파 상호작용의 기법을 분석하는데 사용되어지는데, 예로서 Hashin-Shtrikman bounds가 있다[9][13]. Hashin-Shtrikman Lower는 그 결과가 가장 나쁠때의 에어율이 4% 라는 결과는 이미 보고되었다 [5][9][13]. Hashin-Shtrikman 공식에서 ϵ_1 와 μ_1 는 식(14), 식(15)으로 나타내어진다. 여기서 $g=d^2/a^2$ 는 페라이트로 채워진 공간의 체적을 의미한다. 우리는 제안된 등가재료정수법의 정확도를 접근하고자 유전성물질과 자성물질의 경우에 Hashin Shtrikman의 값을 가지고 등가유전율 ϵ_{eq} 와 등가투자율 μ_{eq} 을 비교하였다. 등가재료정수법은 그림 6, 7, 8에서 보여 주듯이 Hashin-Shtrikman bounds의 값과 매우 일치함을 알 수 있다. 한편 이미 기술된 격자형 페라이트 흡수체의 주파수특성은 측정된 것과 아주 일치함도 알 수 있다[1]. 그러므로 이러한 방법을 사용하여 이러한 기하학적 지식으로부터 인위적인 매개체의 효과적인 성질과 구조상의 재료성질을 예측할 수 있다.

III. 광대역 전파흡수체의 설계

앞장에서 서술했듯이 흡수체의 재료정수의 크기를 변화시키면서 흡수체 설계의 차이를 시험할 수 있다. 그림 9는 본 논문에서 제안한 광대역 전파흡수체의 외형이다. 전파흡수체는 페라이트물질로만 구성되어 있고 그림 10은 그림 9의 측면도를 나타낸다. 각 층의 유전율과 등가재료정수법을 사용하여 계산할 수 있다. 페라이트의 비투자율은 [14]에 의해 고려된 주파수 분산식에 의해 서술되었다.

$$\mu_r = 1 + \frac{K}{(1 + j \frac{f}{f_m})} \quad (16)$$

여기서 f 는 사용주파수, K 는 직류시 비투자율이며 f_m 은 완화주파수이다. 유전율 ϵ_r 는 상수로 나타낸다. 여기서 사용된 sintered 페라이트는 $K=2500$, $f_m=2.5\text{MHz}$, $\epsilon_r=14.0$ 의 특성을 가진다. 여기서 전파흡수체를 공간적으로 변화시키는 기술을 사용함으로써 광대역화 페라이트 전파흡수체를 설계할 수 있다[15][16]. 실제상에서 한계주파수가 고려되지 않았을지라도 이것은 각층의 크기의 비율을 파장에 비교하여 더 작은 cell의 크기로 나눔으로써 높은 주파수에서도 제안된 설계를 적용할 수 있다.

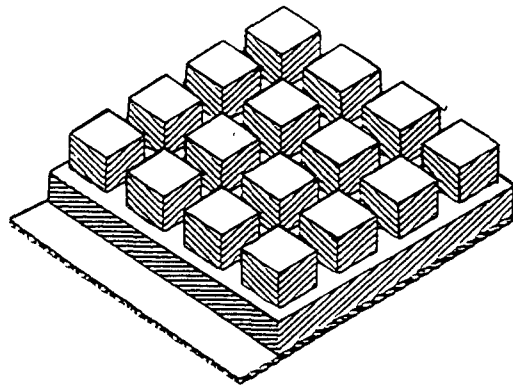


Fig. 9 The Typical Shape of a Wide band Ferrite Electromagnetic Wave Absorber Proposed in this Paper.

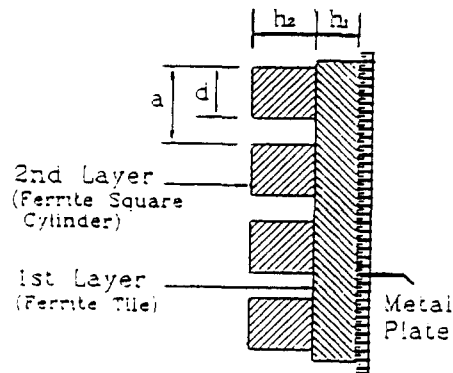


Fig. 10 Cross Section of the electromagnetic Wave Absorber shown in this Paper.

IV. 결 과

정방형 페라이트 기둥구조의 기하학적 크기뿐만 아니라 각 층들의 두께를 변화 시킴으로써 -20dB 이상의 반사감쇠량이 30MHz를 포함한 높은 상한 주파수를 나타내는 최적의 구조를 찾을 수 있었다. 우수한 흡수특성을 가진 이 설계의 결과는 표 1에 나타내었다. 그림 11은 광대역 페라이트 전파흡수체의 반사특성을 나타낸다. 그림 11은 허용치 -20dB 이상의 반사감쇠량이 30~3,690MHz의 대역폭을 나타내고 있음을 보여준다. 이는 종래의 타일형 및 격자형 페라이트 전파흡수체가 가지는 30~370MHz 또는 870MHz보다 훨씬 광대역화 되었음을 보여주고 있다.

Table 1. Dimensions of designed wide band electromagnetic wave absorber

Item	Dimensions (mm)	Band width with the tolerance limits of -20dB
Period(a)	20.0	30~3,690 MHz
Width of ferrite(d)	15.0	
Thickness of ferrite Tile(t1)	6.4	
Thickness of ferrite grid(t2)	11.0	

V. 결 론

2층에 정방형 페라이트 기둥구조를 갖춘 광대역 전파흡수체를 설계하고, 여기서 등가재료정수로는 등가 복소유전율과 등가 복소투자율을 사용한 합성 용량 모델과 합성 인덕턴스 모델에 의해 설명되어졌다. 제안된 등가재료정수법은 Hashin-Shtriman(HS) Lower와 거의 일치함을 나타내었다. 설계, 제안된 광대역 페라이트 전파흡수체는 주파수 반사특성이 30~3690MHz의 범위에서 -20dB 이상의 반사감쇠량을 가지는 우수한 특성을 보였으며 이는 종래의 타일형 페라이트 전파흡수체 및 격자형 전파흡수체의 대역이 30MHz에서 370MHz

또는 800MHz인것에 비해 대단히 양호한 것이다. 이러한 전파흡수체는 전파압실용, EMC 대책 및 GTEM-CELL 제작용으로 활용될 것이다.

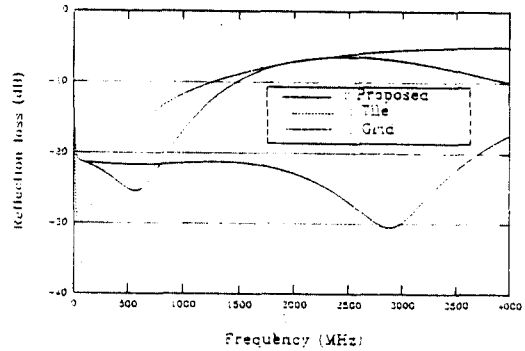


Fig. 11 Shows the reflectivity characteristics with frequencies of the designed wide-band ferrite electromagnetic wave absorber.

References

- [1] Y. Natio, "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 Media: Mathematical Problems in the Mechanics of Composite Materials. Kluwer Academic Publisherd, 1989.
- [4] N. S. Bakhvalov and G. Panasenکو, 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 : Computed and measured results," *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 composite 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. Dulner, "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. Natio, "Formulation of Frequency Dispersion of Ferrite Permeability", *IECE of Japan*, Vol. J59-C, No. 5, pp. 297-304, May 1976.
- [15] Y. Natio. *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.