

# 초광대역특성을 가지는 Ferrite 전파흡수체의 설계법

김동일\* · 정세모\* · 전상엽\*\*

Design Method of Electromagnetic Wave Absorber with  
Ultra Wide-Band Frequency Characteristics.

*Dong-Il Kim\* · Se-Mo Chung\* · Sang-Yup Jun\*\**

Abstract	3. 광대역 전파흡수체의 설계
1. 서론	4. 결과
2. 등가재료정수법	5. 결론

## Abstract

A wide band design method of an electromagnetic wave absorber using exponentially tapered ferrite, which has very wide band frequency characteristics, is proposed and discussed. The wide band electromagnetic wave absorber can be designed by the proposed equivalent material constants method for the regions varying spatially in the shape of ferrite.

Furthermore, the wide band ferrite electromagnetic wave absorber with taper, which have not only excellent reflectivity frequency characteristics but also the band width of 30MHz to 2150 or 2450MHz under the tolerance limits of -20dB reflectivity, were designed.

## 1. 서론

최근 사무자동화, 공장자동화 등에 따라 전자파 방해(EMI)는 심각한 문제로 대두되고 있다. 따라서 이러한 EMI나 EMC에 대한 대책의 일환으로

그 목적에 따라 다양한 전파흡수체가 이용되고 있으며, 이러한 전파흡수체는 광대역화, 박층화 및 경량화 등이 요구되고 있다.

종래의 도체판위에 소결페라이트 타일을 취부한 단층페라이트 전파흡수체는 30MHz에서 400MHz

\* 한국해양대학교

\*\* 한국해기연수원

의 주파수 범위에서 -20dB이상의 반사감쇄량을 가지고 있다.<sup>1), 2)</sup> 그리고 저자에 의해 고안된 그리드형 페라이트 전파흡수체의 경우 상기의 반사감쇄량을 가지는 상한주파수 범위가 700MHz로 광대역화 되었다.

최근 전파흡수체의 주된 용도는 각종 전자장비로부터의 누설전자파, 혹은 전자파내성(Immunity)의 검사나 측정을 위한 전파압실의 구성용, TV의 허상대책용 등이다.<sup>3)</sup> 그러나 국제규격기준(ANSI C63.4-1991, CISPR A SEC. 109, 또는 IEC 801-3)을 만족시키기 위해 전파압실용 전파흡수체는 이용가능 주파수 범위가 30MHz 에서 1000MHz 또는 3GHz 까지 요구되고 있다.

본 논문에서는 상기의 요구조건을 충족시킬 수 있는 전파흡수체를 개발하기 위하여 테이퍼 구조를 가지는 초광대역 페라이트 전파흡수체를 고안하고 개발하였으며, 이의 해석을 위해 등가재료정수법을 제안, 이용하였다.

그 결과 30MHz 에서 2150MHz 혹은 2430MHz의 주파수 범위에서 전파흡수특성이 양호한 초광대역 전파흡수체를 실현할 수 있었으며, 이는 EMI/EMC 대책용으로 다양하게 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 2. 등가재료정수법

먼저, 그림 1과 같이 y방향의 폭 w, 두 평판사이의 간격 g인 평행판전송선에서 z방향으로 전류가 흐르는 경우, z방향으로 단위길이당 용량과 인덕턴스를 계산한다. 이 경우 단위길이당 용량은 식(1)과 같다.<sup>4)</sup>

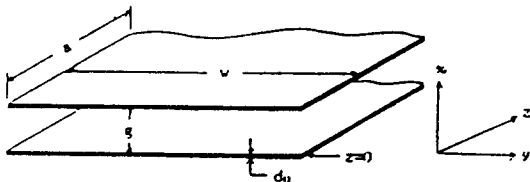


Fig. 1. A Parallel Plate Transmission Line

$$\frac{C}{a} = \frac{\epsilon w}{g} \dots\dots\dots (1)$$

여기서, C는 평행도체판간의 총 용량이며,  $\epsilon$ 은 전송선로에 채워진 물질의 유전율이다.

이제 계산방법을 초광대역전파흡수체의 설계에 이용할 그림 2와 같은 모델로 확장하여 보자.

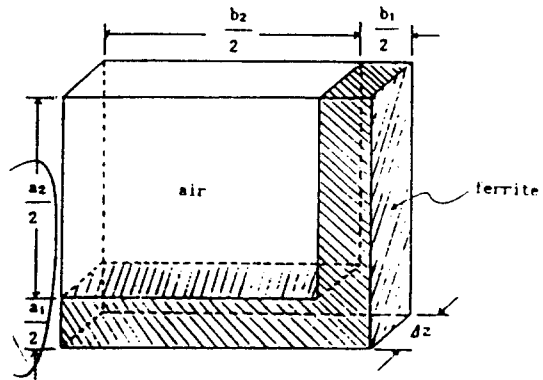


Fig. 2. A Model for Calculation of Equivalent Material Constants

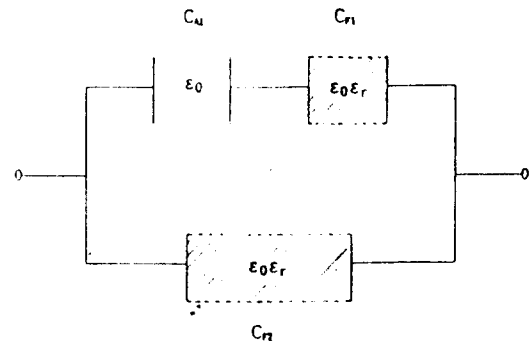


Fig. 3. A Synthesized Capacitance Model

그림 2를 이용하여 그림 3과 같은 합성용량 모델을 만들 수 있으며, 총 합성용량 C는 식(1)을 확장하여 식(2)와 같이 계산할 수 있다.

$$C = C_1 + C_2 = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 \Delta z \{ b a_2 + a_1 (b_1 + b_2 \epsilon_r) \}}{b (b_1 + b_2 \epsilon_r)} \dots\dots\dots (2)$$

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

$$C_{A1} = \frac{\epsilon_r a_2 \Delta_z}{b_2}$$

$$C_{F1} = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 a_2 \Delta_z}{b_1}$$

$$C_2 = C_{F2} = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 a_1 \Delta_z}{b}$$

$$b = b_1 + b_2$$

여기서  $\epsilon_r$ 은 그림 2의 빗금친 부분에 채워진 페라이트 재료의 비유전율이며,  $\epsilon_0$ 는 진공의 유전율이다. 따라서 그림 2에서  $\Delta z$ 의 두께를 가지는 구조에 대한 등가유전율  $\epsilon_{eq}$ 는 식(3)과 같이 계산할 수 있다.

$$\epsilon_{eq} = \frac{bC}{\epsilon_r a \Delta z} \dots\dots\dots (3)$$

식(2)를 식(3)에 대입하면, 그림 2와 같은 구조에 대한 등가유전율  $\epsilon_{eq}$ 는 식(4)와 같이 주어진다.

$$\epsilon_{eq} = K_H \epsilon_r + \frac{(1-K_H)\epsilon_r}{K_E + (1-K_E)\epsilon_r} \dots\dots\dots (4)$$

여기서,

$$K_H = \frac{a_1}{a_1 + a_2} \dots\dots\dots (5)$$

$$K_E = \frac{b_1}{b_1 + b_2}$$

또한, 그림 1에서  $ga$ 구역에 있는 자속은 식(6)과 같이 주어진다.

$$\Phi = B_y ga \dots\dots\dots (6)$$

그리고 자속밀도  $B_y$ 는 평행도체판에 흐르는 전류가  $I$ 일때 식(7)과 같으며,

$$w B_y = \mu I \dots\dots\dots (7)$$

자기인덕턴스  $L$ 은

$$L \frac{dI}{dt} = \frac{d\Phi}{dt} \dots\dots\dots (8)$$

과 같은 관계를 가지고 있으므로, 식(6), 식(7) 및 식(8)로부터 단위길이당 인덕턴스( $L/a$ )는 식(9)와 같이 계산할 수 있다.

$$\frac{L}{a} = \frac{g\mu}{w} \dots\dots\dots (9)$$

그림 2를 이용하여 상기와 같은 방법으로 그림 4와 같은 합성인덕턴스 모델을 만들 수 있으며, 합성인덕턴스  $L$ 은 식(9)을 확장하여 식(10)과 같이 구할 수 있다.

$$L = L_1 + L_2 = \frac{\mu_0 \mu_r \{ab_2 + b_1(a_1 + a_2 \mu_r)\} \Delta z}{a(a_1 + a_2 \mu_r)} \dots\dots\dots (10)$$

여기서,  $L_1 = \frac{L_{A1}L_{F1}}{L_{A1} + L_{F1}} = \frac{\mu_r \mu_r b_2 \Delta_z}{a_1 + a_2 \mu_r}$

$$L_{A1} = \frac{\mu_r b_2 \Delta_z}{a_2}$$

$$L_{F1} = \frac{\mu_0 \mu_r b_2 \Delta_z}{a_1}$$

$$L_2 = L_{F2} = \frac{\mu_0 \mu_r b_1 \Delta_z}{a}$$

$$a = a_1 + a_2$$

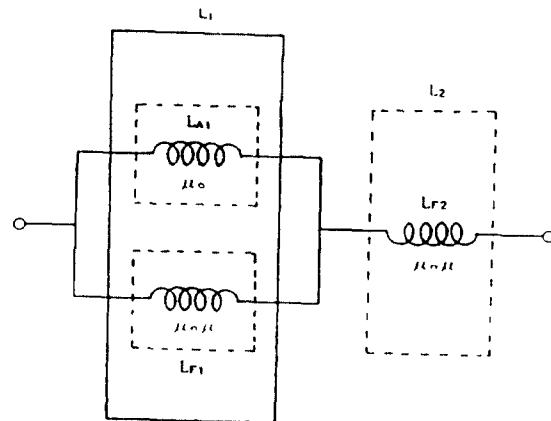


Fig. 4. A Synthesized Inductance Model.

여기서,  $\mu_r$ 은 그림 2의 빗금친 부분에 채워진 페라이트 재료의 비투자율이며,  $\mu_0$ 는 진공의 투자율

이다. 따라서 그림 2에서  $\Delta z$ 의 두께를 가지는 구조에 대한 등가투자율  $\mu_{eq}$ 는 식(12)와 같이 계산할 수 있다.

$$\mu_{eq} = \frac{aL}{\mu_0 b \Delta z} \dots\dots\dots (11)$$

식(10)을 식(11)에 대입하면 그림 2와 같은 구조에 대한 등가투자율  $\mu_{eq}$ 는 식(12)와 같이 주어진다.

$$\mu_{eq} = K_E \mu_r + \frac{(1-K_E)\mu_r}{K_H + (1-K_H)\mu_r} \dots\dots\dots (12)$$

상기 설명한 방법들을 등가재료정수법이라고 한다.

### 3. 광대역 전파흡수체의 설계

그림 5는 본 논문에서 제안한 광대역 페라이트 전파흡수체의 외양이다. 제안한 전파흡수체는 페라이트 물질만으로 구성되어 있으며, 전파흡수체의 전형적인 형상은 그림 5와 같고, 단면도는 그림 6과 같다. 여기서 높이  $h_1$ 를 가지는 테이퍼부가 그림 7과 같이 지수함수적으로 변하며, 테이퍼부의 단면을  $n-2$ 개의 층으로 등분할 한다고 가정하면 그림 2의 등가재료정수 계산을 위한 모델에 각각 대응하는 제  $i$ 층의 치수는 식(13)과 식(14)로 나타낼 수 있다.

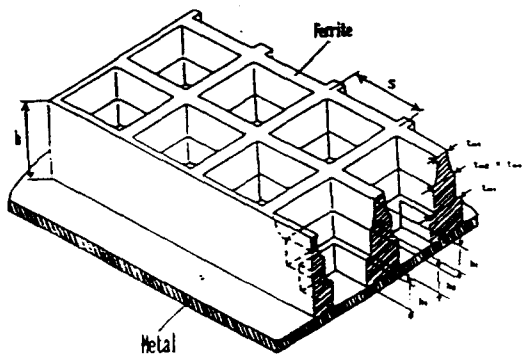


Fig. 5. The Typical Shape of a Wide-Band Ferrite Electromagnetic Wave Absorber Proposed in this Paper.

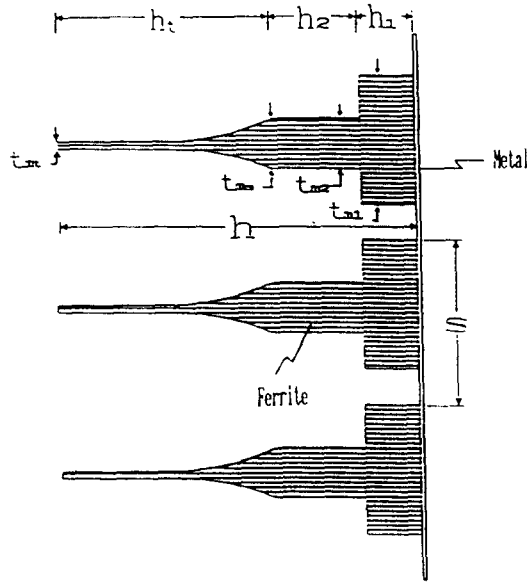
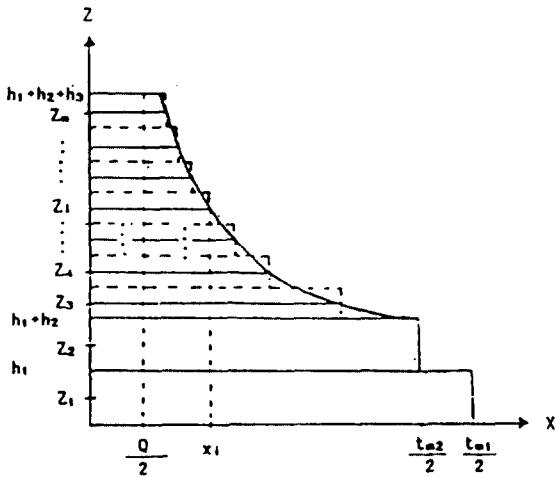


Fig. 6. Cross Section of the Electromagnetic Wave Absorber Shown in Fig. 5.

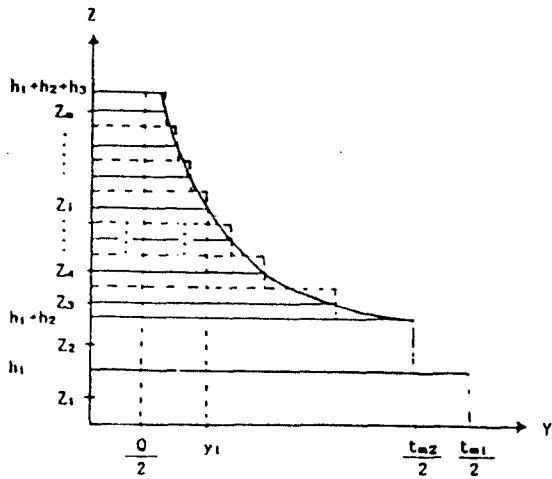
$$\begin{aligned} x_1 &= \frac{tm_1}{2} \\ y_1 &= \frac{tm_1}{2} \\ z_1 &= \frac{h_1}{2} \end{aligned} \quad \left. \begin{array}{l} \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right\} i = 1 \text{ 일 때} \dots\dots\dots (13)$$

$$\begin{aligned} x_2 &= \frac{tm_2}{2} \\ y_2 &= \frac{tm_2}{2} \\ z_2 &= h_1 + \frac{h_2}{2} \end{aligned} \quad \left. \begin{array}{l} \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right\} i = 2 \text{ 일 때}$$

$$\begin{aligned} x_i &= \frac{1}{2} (tm - Q) e^{-k(z_i - h_1 - h_2)} + \frac{Q}{2} \\ y_i &= \frac{1}{2} (tm - Q) e^{-k(z_i - h_1 - h_2)} + \frac{Q}{2} \\ z_i &= h_1 + h_2 + \frac{h_i}{n-2} \left\{ (i-3) + \frac{1}{2} \right\} \end{aligned} \quad \left. \begin{array}{l} \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right\} i \geq 3 \text{ 일 때} \dots\dots\dots (14)$$



(a) for x-axis



(b) for y-axis

Fig. 7. Divided Cross Sections in z-Direction.

여기서  $x_i$ 는  $b_i/2$ ,  $y_i$ 는  $a_i/2$  그리고  $z_i$ 는 제  $i$ 층에 있어서의 중심위치에 각각 대응한다. 식(14)에서  $n$ 은 전체 층수,  $Q$ 는 테이퍼부 끝단의 최소폭을 나타낸다.

또한,

$$k = \frac{P}{h_i} \dots\dots\dots (15)$$

이며, 여기서  $P$ 는 테이퍼부의 형상을 결정하는 임의의 수이다.

따라서 각층의 등가재료정수를 등가재료정수법을 이용하여 구할 수 있다.

한편, 페라이트투자율의 주파수분산식은 식(16)과 같다.<sup>3)</sup>

$$\mu = 1 + \frac{K}{(1+j\frac{f}{f_m})} \dots\dots\dots (16)$$

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

그림 8은 각층의 등가재료정수를 이용한 다층구조의 전파흡수체를 나타내고 있다. 따라서 전파흡수체의 공간적인 형상을 변화시킴으로써 투자율 및 유전율을 제어하여 광대역화 페라이트전파흡수체의 설계가 가능하다.

#### 4. 결 과

초투자율 2500인 높은 투자율을 가지는 Ni-Zn계 페라이트의 재료정수 즉, 복소유전율 및 복소투자율을 30MHz에서 4000MHz 범위에서 측정하였다. 그리고 앞에서 제안한 방법을 이용하여 광대역화 전파흡수체를 설계하였다.

설계한 전파흡수체는 표 1에 나타난 바와 같이 우수한 흡수특성을 보였다.

그림 9(a)는 테이퍼부를 가지는 광대역전파흡수체 Design # -1에 대한 반사주파수특성을 나타내고 있으며, 기존 타일형 페라이트 전파흡수체와 그리드형 페라이트 전파흡수체의 특성을 동시에 한 그래프에 나타내어 상호 비교하고 있다. 그림 9(b)는 그림 9(a)에 대한 규격화 입력임피던스를 스미스차트상에 나타내고 있다. 그림 10(a) 및 그림 10(b)는 Design # -2에 대한 반사주파수특성 및 규격화입력임피던스를 나타내고 있다.

그림 9와 그림 10에서 Design # -1 및 Design # -2와 같은 테이퍼형 페라이트 전파흡수체는 -20dB이상의 반사감쇄량을 가지는 주파수범위가 매우 넓은 광대역 특성을 가짐을 알 수 있다.

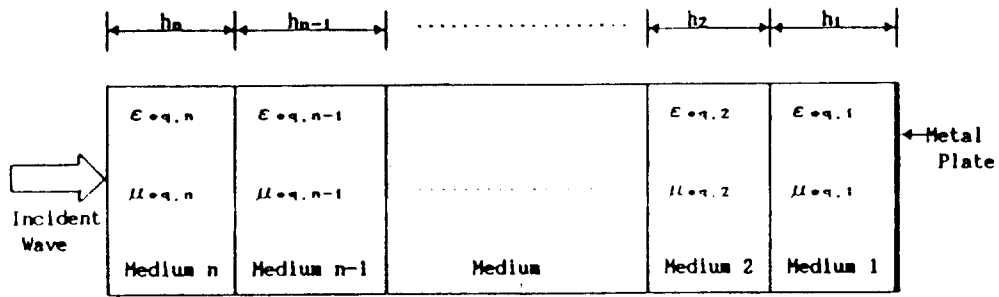


Fig. 8. Multi-layered Electromagnetic Wave Absorber Model.

〈표 1〉 Designed Broad-band Electromagnetic Wave Absorbers with Excellent Characteristics using High Permeability Ni-Zn Ferrite

Nos.	Measured material constants parameters	Absorber Dimension (mm)	Band width with the tolerance limits of -20dB	Remark
Design # - 1	$\epsilon_r = 14.0$ $K = 2500$ $f_m = 2.5$	$t_{m1} = 12.8$ $t_{m2} = 7.4$ $S = 20.0$ $h_1 = 5.8$ $h_2 = 0$ $h_t = 48.0$ $P = 20$ $Q = 0.8$	30-2150 MHz	TAPERED
Design # - 2	$\epsilon_r = 14.0$ $K = 2500$ $f_m = 2.5$	$t_{m1} = 12.8$ $t_{m2} = 1.6$ $S = 20.0$ $h_1 = 6.6$ $h_2 = 15.0$ $h_t = 30.0$ $P = 15$ $Q = 0.6$	30-2430 MHz	TAPERED

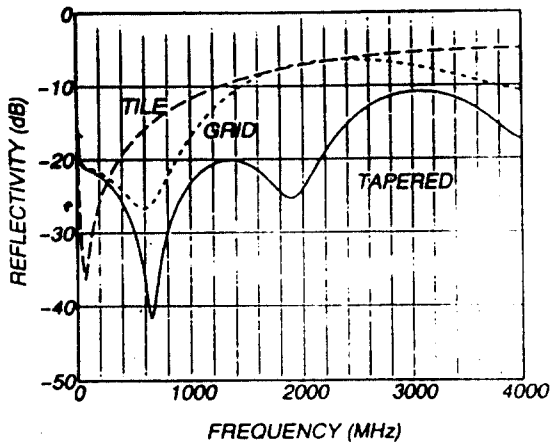


Fig. 9(a). Reflectivity Frequency Characteristics of the Designed Wide-Band Electromagnetic Wave Absorber of Design # -1 in Table 1.

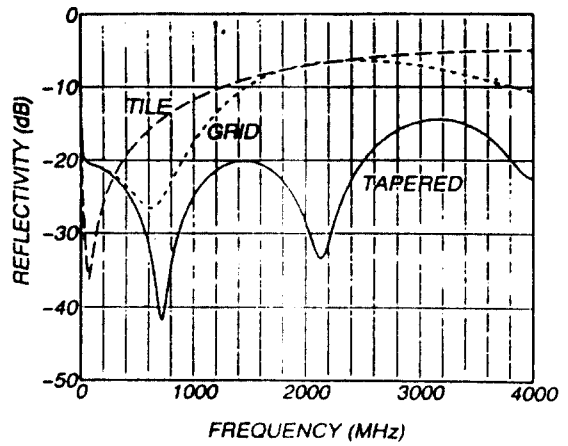


Fig. 10(a). Reflectivity Frequency Characteristics of the Designed Wide-Band Electromagnetic Wave Absorber of Design # -2 in Table 1.

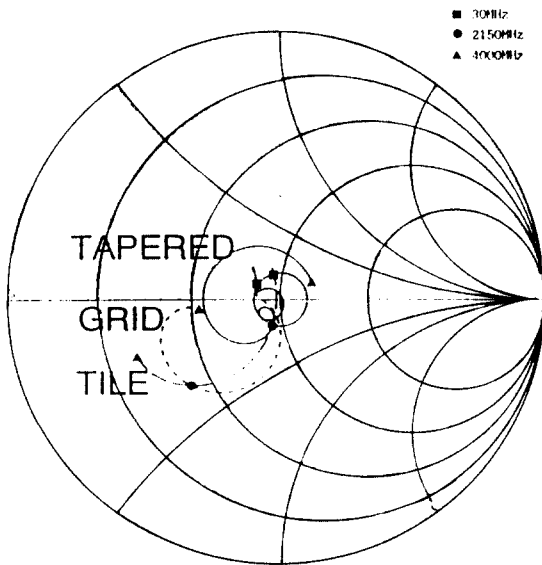


Fig. 9(b). Normalized Input Impedance of the Designed Wide-Band Electromagnetic Wave Absorber of Design # -1 in Table 1.

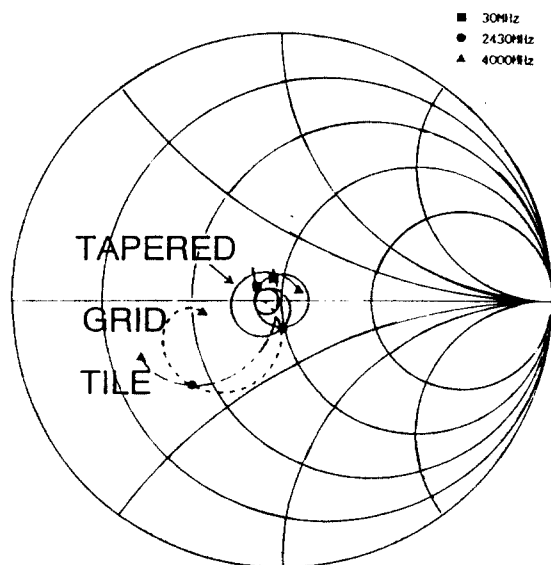


Fig. 10(b). Normalized Input Impedance of the Designed Wide-Band Electromagnetic Wave Absorber of Design # -2 in Table 1.

### 5. 결 론

페라이트의 형상을 지수함수적으로 변화시키는 방법에 의한 전파흡수체의 광대역화기법을 제안하고, 공간적으로 페라이트의 형상이 변하는 부분의 재료정수 즉, 등가복소유전율 및 등가복소투자율을 합성용량법 및 합성인덕턴스법을 제안하여 계산하였다. 그 결과 테이퍼부를 가지도록 설계한 광대역화 전파흡수체의 반사주파수특성은 Design # -1의 경우 30MHz에서 2150MHz, Design # -2의 경우 30MHz에서 2430MHz의 범위에서 -20dB 이상의 반사감쇄량을 가지는 우수한 특성을 보였으며, 이는 기존의 타일형 페라이트 전파흡수체 및 그리드형 전파흡수체의 주파수대역이 각각 30MHz에서 370MHz 및 870MHz인 것에 비해 괄목할 만한 것이다. 따라서 이러한 전파흡수체는 전파암실 설계용, GTEM-cell 및 EMC대책용 등으로 이용이 기대된다.

### 참고문헌

(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) Y. Naito, "Recent Topics of Electromagnetic Wave Absorber for EMI and EMS", MW92-67, IEICE of Japan, pp. 67-74, Jul. 1992.  
 (4) H. Takahashi, Waves I, Maruzen Publishing Co., Tokyo, Japan, 1973.  
 (5) Y. Naito, "Formulation of Frequency Dispersion of Ferrite Permeability", IECE of Japan, Vol. J59-C, No.5, pp. 297-304, May 1976.  
 (6) Y. Naito, Electromagnetic Wave Absorber, OHM Publishing Co., Japan, 1987.  
 (7) P. A. Chatterton and M. A. Houlden, EMC-Electromagnetic Theory to Practical Design, Chapter 3, John Wiley & Sons Ltd, 1992.