

FDTD를 이용한 격자형 페라이트 전파흡수체 특성 해석

FDTD Analysis of the Absorption Characteristics for Grid Ferrite Electromagnetic Wave Absorber

이재용* · 정연춘** · 명노훈*

Jae-Yong Lee* · Yeon-Choon Chung** · Noh-Hoon Myung*

요 약

전자파 장해(EMI) 및 전자파 내성(EMS) 시험용 전자파 무반사실에 널리 사용되는 격자형 페라이트 전파흡수체의 반사 계수를 시간 영역 유한 차분법(finite difference time domain method ; FDTD)을 사용하여 해석하였다. 주파수 분산 특성을 갖는 페라이트 매질 및 페라이트 경계면에서의 전자파 해석에 전개와 자계 외에 자속을 추가로 사용하여 주파수 분산 특성과 경계조건을 모델링하였으며, 주기적 배열 구조에 널리 사용되는 Floquet 정리를 이용하여 격자형 페라이트 전파흡수체의 FDTD 해석을 단위 셀만의 FDTD 해석 문제로 단순화시켰다. 저주파 근사 모델로서 전파흡수체의 특성 해석에 주로 사용되는 균질화 방법은 단위 셀의 매질과 공기와 의 부피 비율만 고려할 뿐, 매질의 기하학적 형태를 고려할 수 없으나, 본 논문의 방법은 단위 셀의 기하학적 형태 및 매질 특성을 모두 고려할 수 있고, 고주파 영역의 특성도 쉽게 해석할 수 있다.

Abstract

The reflectivity of a grid ferrite electromagnetic wave absorber is analyzed using finite difference time domain (FDTD) method, which is usually used in anechoic chambers for EMI/EMS test. The frequency dispersive characteristics of ferrite medium and its boundary condition are modeled using magnetic flux in addition to E- and H-fields. By applying Floquet's theorem, FDTD analysis of the grid ferrite absorber with periodic infinite array is simplified as a unit cell problem. The method of homogenization which is mainly utilized in the calculation of absorber reflectivity as a low frequency technique takes only into account volume fraction of the unit cell of the absorber except for the structure of medium geometry. However, the presented method in this paper can analyze the geometry effect of the unit cell with its medium characteristics up to high frequency region.

I. 서 론

최근 들어 사무용, 군사용, 가정용 통신 및 전자 기기의 사용이 급격하게 증가하면서 전자파 장해

(EMI)에 대하여 지대한 관심이 기울여지고 있다. 이러한 전자파 장해에 대한 적절한 대책이 없는 제품은 세계 시장에 나설 수 없으며 전자파 장해에 대한 기준마저도 점점 강화되고 있는 추세이다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 제품의 전자파 장해에

* 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(Dept. of Electrical Engineering, KAIST)

** 한국표준과학연구원 전자기 환경 그룹(Div. of Electromagnetic Metrology EMC Group, KRISS)

· 논문번호 : 980224-026

· 수정완료일자 : 1998년 5월 15일

관한 많은 측정을 해야 하는데, 야외시험장(OATS)을 대신하여 저렴하고 정확한 측정을 할 수 있는 다양한 전파흡수체를 이용한 전자파 무반사실이 널리 사용되고 있다.

복사 전자기장의 내성 규격은 IEC 1000-4-3으로 30~1000 MHz에서 반사손실이 20 dB 이상일 것을 표준으로 삼고 있다. 이와 같은 특성을 얻기 위하여 금속 배면이 부착된 단일층 격자형 페라이트 전파흡수체가 널리 사용된다. 이것은 임피던스 정합에 의한 반사량의 감소를 이용한 것인데, 입사파의 파동 임피던스와 전자파 흡수 재료의 특성 임피던스의 정합에 의하여 입사파가 반사없이 흡수체 내부로 입사하면 페라이트의 자성손실에 의해 흡수체를 통과하는 전자파를 흡수함으로써 전체 반사 전자파를 최소화하는 것이다.

30~1000 MHz 전 범위에서 흡수 특성이 우수한 전파흡수체는 1980년대에 들어서 전파흡수체의 반사 특성을 측정 및 계산 가능하면서부터 발전하게 되었다^[1]. 1962년 Hashin과 Shtrikman이 정전계에서 에너지 보존법칙을 이용하여 주기적 무한 배열 구조의 유효 유전율을 계산했는데, 이 Hashin-Shtrikman 공식을 이용하여 Kuester와 Holloway는 주기가 파장에 비해 작은 저주파수 영역 해석법으로 균질화 방법을 고안하여 현재 전파흡수체 해석에 널리 사용되고 있다^{[2]~[5]}. 그는 이 방법을 이용하여 주기적 무한 배열 구조의 전파흡수체를 주기 방향으로 유효 유전율 및 유효 투자율을 가지는 균일한 매질로 단순화시키고, 평면파에 의한 전파흡수체의 반사 특성을 전송선 방법으로 해석하여 측정치와 잘 맞음을 보였다. 그러나 이 균질화 방법은 단위 셀의 매질과 공기와의 부피 비율만 고려할 뿐 단위 셀의 기하학적 형태에 의한 전자파 산란 특성을 고려할 수 없는 단점이 있다.

한편, Maxwell 방정식의 미분 형태를 유한 차분법을 이용해 계산하는 FDTD 방법은 1966년 Yee의 알고리즘이 개발된 이후, 컴퓨터 기술과 이론상의 많은 발전을 통하여 많은 전자파 문제를 풀 수 있는 전파 해석이 가능한 방법으로 각광 받고 있다^[6]. FDTD 방법은 페라이트와 같은 주파수 분산 특성을 가지는 매질의 전자파 산란 해석과 주기적 무한 배열 구조를 가지는 구조의 해석에도 다양하게 적용

되어 오고 있다^[6].

본 논문에서는 페라이트 전파 흡수체로 가장 널리 사용되고 있는 격자형 페라이트 전파흡수체의 전자파 흡수 특성을 FDTD 방법을 이용하여 해석하고, 이에 필요한 페라이트 매질 및 페라이트 경계면의 모델링 방법을 제시하였으며 해석 결과를 기존의 균질화 방법과 비교하였다.

II. 격자형 페라이트 전파흡수체 해석

전자파 무반사실에 요구되는 전파흡수체의 특성을 만족시키기 위해 그림 1과 같이 금속 배면이 부착된 단일층 격자형 페라이트 전파흡수체가 널리 사용된다.

그림 1과 같은 주기적 무한 배열 구조에 대한 FDTD 해석은 1993년 Tsay와 Pozar에 의해 처음 시도된 이후 많은 연구가 진행되고 있는데, 흡수 경계 조건(absorbing boundary condition ; ABC)과 Floquet 정리를 이용한 주기적 경계 조건을 이용하여 주기적 무한 배열 구조에 의한 산란 특성을 단위 셀만의 전자파 산란 해석으로 구하고 있다^{[7]~[9]}.

Floquet 정리는 단위 셀 내부의 임의의 점에서 전개와 자계 값은 이웃하는 셀의 동일점에서의 전개와 자계 값에 이웃하는 셀과의 거리에 해당하는 위상차를 곱한 값이 되기 때문에, 이를 이용하여 주

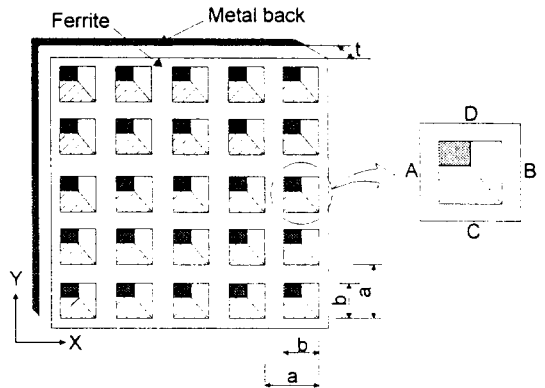


그림 1. 단일층 격자형 페라이트 전파흡수체의 구조 (FFG-1000)

Fig. 1. Structure of a single-layer grid ferrite absorber (FFG-1000).

기적 무한 배열 구조에서의 전계와 자계 값을 Floquet 모드의 합으로 나타낼 수 있다는 정리이다. 그러나 이 정리는 주파수 영역의 해석 방법이므로 시간 영역 해석법인 FDTD 방법에 쉽게 적용되기 어려운 단점이 있다. 일반적인 FDTD 계산은 펄스파를 입사시켜 단 한 번의 계산으로 관심 주파수 영역의 특성을 모두 해석할 수 있지만, 주기적 배열 구조의 경우 Floquet 정리를 적용하기 위하여 단일 주파수의 사인파를 입사시키거나 혹은, 펄스파를 수직 입사시켜서 계산한다. 전자파가 수직 입사할 경우 이웃하는 셀과의 위상차가 0이 되기 때문에 Floquet 정리는 무척 단순해진다. 본 논문에서는 Floquet 정리를 쉽게 적용하기 위하여 Gaussian 펄스파가 페라이트 전파흡수체에 수직 입사하는 경우의 특성을 해석하였다.

그림 1과 같은 격자형 페라이트 전파흡수체에 전자파가 수직 입사할 경우 A면과 B면, C면과 D면의 전자계 성분이 동일하게 되어 그림 2와 같은 단위 셀에서 $x=0$ 인 면과 $x=a$ 인 면, $y=0$ 인 면과 $y=a$ 인 면의 4개의 경계면이 2면씩 서로 연결된 것과 동일한 문제로 바뀌게 된다^[9]. 따라서 측면 경계면의 전계와 자계를 FDTD 방법을 이용하여 계산할 경우에 서로 연결된 경계면의 자계와 전계를 이용하여 계산할 수 있으므로 주기적 구조의 FDTD 계산이 가능해진다. 격자형 페라이트 전파흡수체는 금속 경계면이 부착된 구조이므로 그림 2와 같이 금속배면 부분을 완전 도체면으로 처리한 다음, 자유공간을 향하는 경계면을 Berenger의 PML(perfectly matched layer)로 처리하면 FDTD 계산을 위한 모든 경계면이 완성된다. 다음으로 입사파를 그림 2의 전체파/산란파 경계에 입사시킨 후, 전체파/산란파 경계와 PML 사이의 영역($z=z_r$)에서 반사파를 계산해 내면 격자형 페라이트 전파흡수체의 반사 계수를 해석할 수 있다.

페라이트는 주파수 분산 특성을 가지는 매질로서 자구의 이동에 의한 공명, 자화의 이완, 스핀 공명의 세 가지 자화 특성을 가지고 있다. 자구의 이동에 의한 공명은 저주파수 영역의 자화 현상이며, 미세 분말로 소결된 구조에서는 다중 구조의 자구가 형성될 수 없으므로 무시된다. 또한, 스핀 공명도 수 GHz에서의 현상이며 실제로는 작은 값이다. 그

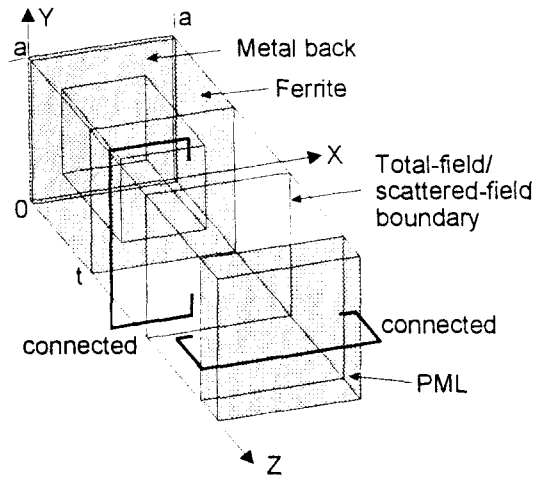


그림 2. 격자형 페라이트 전파흡수체의 단위 셀과 FDTD 모델링

Fig. 2. The unit cell of the grid ferrite absorber and its FDTD modeling.

러므로 페라이트의 주파수 분산 특성은 다음과 같이 자화의 이완에 의한 복소 투자율 방정식으로 기술되어진다^[5].

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

여기서, f_r 은 완화 주파수이며 K 는 초투자율을 나타낸다.

주파수 분산 특성을 가지는 매질을 효과적으로 FDTD 계산을 하기 위한 방법은 크게 RC(recursive convolution) 방법과 ADE(auxiliary differential equation) 방법이 사용되고 있다. 임의의 자화율 함수를 여러 가지 수학적 방법을 이용하여 메모리나 알고리즘의 관점에서 간단하고 효과적인 RC 방법을 적용할 수 있으나, 이 방법은 정확성이 떨어지는 단점이 있다. 페라이트 전파흡수체는 0.1 mm의 변화에도 특성의 변화가 큰 구조이기 때문에 RC 방법은 적당하지 못하고 메모리 사용이 많지만 정확한 계산이 가능한 ADE 방법을 이용하여 계산하는 것이 타당하다. ADE 방법은 전계와 자계 외에 전속이나 자속을 추가로 사용하여 FDTD 계산을 하는 방법인데 페라이트의 경우 다음과 같이 계

계산할 수 있다.

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 \left[1 + \frac{K}{1 + j\omega\tau_r} \right] \mathbf{H} \quad (3)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = -\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (4)$$

여기서 $\omega = 2\pi f$, $\tau_r = 1/(2\pi f_r)$ 이다. 식 (3)의 방정식은 주파수 영역의 방정식이므로 역 Fourier 변환을 하여 시간 영역의 방정식으로 변환한 다음, 차분 방정식으로 변환하면 다음과 같다.

$$\mathbf{B}(1 + j\omega\tau_r) = (1 + K + j\omega\tau_r) \mu_0 \mathbf{H} \quad (5)$$

$$(1 + \tau_r \frac{\partial}{\partial t}) \mathbf{B} = (1 + K + \tau_r \frac{\partial}{\partial t}) \mu_0 \mathbf{H} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{H}^{n+1/2} &= \frac{2\mu_0\tau_r - (K+1)\mu_0\Delta t}{2\mu_0\tau_r + (K+1)\mu_0\Delta t} \mathbf{H}^{n-1/2} \\ &+ \frac{\Delta t + 2\tau_r}{2\mu_0\tau_r + (K+1)\mu_0\Delta t} \mathbf{B}^{n+1/2} \\ &+ \frac{\Delta t - 2\tau_r}{2\mu_0\tau_r + (K+1)\mu_0\Delta t} \mathbf{B}^{n-1/2} \end{aligned} \quad (7)$$

대부분의 FDTD 계산에서 FDTD 격자 내부는 동일한 매질로 구성되어 있기 때문에 경계 조건을 만족시키기 위한 별도의 노력이 필요하지 않다. 다만 곡면과 같이 FDTD 격자 구조와 매질 경계면이 일치하지 않는 경우 경계 조건을 만족시키기 위한 특별한 방법이 필요하다. 그러나 그림 3과 같이 매질이 임의의 유전율이나 투자율을 가질 경우 매질 구조가 FDTD 격자 구조와 일치할 경우에도 경계 조건을 만족시키기 위한 방법이 필요하게 된다. 이는 FDTD 격자 구조의 특성상 전계의 위치와 자계의 위치가 서로 반 격자만큼씩 어긋나 있으므로 인하여 전계와 자계를 계산하는 영역 내부에서 매질의 특성 변화가 발생하기 때문이다. 그림 3은 페라이트 경계면에서 전계 $E_z|_{i,j,k}$ 를 구하는 과정을 나타낸 그림이다. 전계 $E_z|_{i,j,k}$ 를 계산하는 데 필요한 영역은 그림 3에 나타난 것과 같이 점선으로 둘러싸인 영역으로서 실선으로 나타난 4개의 FDTD 격자를 포함하는 영역이다. 이와 같은 경우 전계 $E_z|_{i,j,k}$ 를 계산하고자 하는 영역 내부에서 매질의 변화가 발생하고, 경계 조건을 만족시킨 계산을 해야 하는 문제

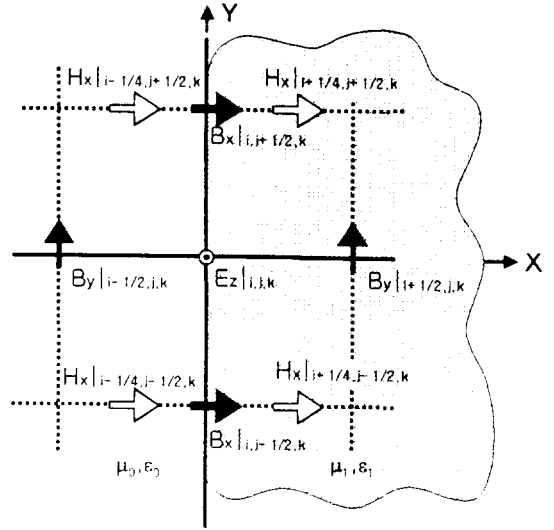


그림 3. 페라이트 경계면에서의 전계 FDTD 해석
Fig. 3. E field FDTD analysis on the ferrite boundary.

가 발생한다. 그림 3에서 경계면에 수직 방향 성분의 자속은 경계면에서 연속이지만 자계는 불연속을 가진다. 이와 같은 경계 조건을 만족시키기 위해 그림 3의 흰색 화살표와 같이 연속인 자속($B_x|_{i,j+1/2,k}$, $B_x|_{i,j-1/2,k}$)을 이용하여 자계를 두 부분으로 나누어 계산하는 것이 바람직하다. 즉, 자속과 식(7)을 이용하여 페라이트 부분의 자계($H_x|_{i+1/4,j+1/2,k}$, $H_x|_{i+1/4,j-1/2,k}$)를 구하고, 자속을 이용하여 공기 부분의 자계($H_x|_{i-1/4,j+1/2,k}$, $H_x|_{i+1/4,j-1/2,k}$)를 구하여 다음과 같이 경계면의 전계를 구한다.

$$\begin{aligned} E_z|_{i,j,k}^{n+1} &= E_z|_{i,j,k}^n + \\ &\frac{\Delta t}{(\epsilon_0 + \epsilon_i)\Delta} \{ 2H_y|_{i+1/2,j,k}^{n+1/2} - 2H_y|_{i-1/2,j,k}^{n+1/2} \\ &+ H_x|_{i+1/4,j-1/2,k}^{n+1/2} - H_x|_{i+1/4,j+1/2,k}^{n+1/2} \\ &+ H_x|_{i-1/4,j-1/2,k}^{n+1/2} - H_x|_{i-1/4,j+1/2,k}^{n+1/2} \} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 $i = i\Delta x$, $j = j\Delta y$, $k = k\Delta z$ 를 의미하고 첨자 n 은 해당 전자계 값이 $n\Delta t$ 에서 샘플링 되었음을 의미한다.

III. 수치 결과

일반적으로 FDTD 계산에 Gaussian 펄스파와 같이 입사파의 스펙트럼이 전 영역에 걸쳐 존재하는 입사파를 사용할 경우 모든 주파수 영역에서 정확한 계산을 할 수는 없다. 전력 스펙트럼 중 가장 큰 값을 기준 전력이라고 하면 기준 전력의 약 -20 dB까지의 주파수 범위까지 정확한 계산을 할 수 있도록 FDTD 격자의 크기를 최고 주파수 파장의 1/10~1/20 이하가 되도록 조정한다. 또한, FDTD 격자의 크기가 파장의 약 1/4보다 큰 영역에서는 입사파의 전력이 잡음 수준인 -100 dB 이하가 되도록 펄스 폭을 조정하게 되면 계산하고자 하는 주파수 범위 내에서 정확한 FDTD 계산을 할 수 있다.

본 연구에서 사용된 격자형 페라이트 전파흡수체는 그림 1과 같이 전자파 장해 및 전자파 내성 시험용 전자파 무반사실에 널리 사용되는 FFG-1000이다^{[5],[10]}. FFG-1000은 페라이트의 두께가 19 mm, 단위 셀의 크기가 20 mm × 20 mm, 개구부의 크기가 13.5 mm × 13.5 mm, 물성은 $K=1071$, $f_r=6.3$ MHz 및 $\epsilon_r=12.5$ 이다. FDTD 계산된 반사파는 주기적 구조에 의한 고차 Floquet 모드의 발생으로 인하여 진행 모드와 감쇠 모드를 함께 가지고 있으므로 계산 결과로부터 Floquet 진행 모드만을 분리해 내야 한다. Floquet 진행 모드 중에서 고차 모드는 입사파의 파장이 주기적 구조의 주기보다 작을 때 발생하게 되므로 사용하는 주파수 범위를 알면 진행되는 고차 모드의 범위도 알 수 있다. 본 논문에 사용된 FFG-1000의 격자 크기가 20 mm이므로 Floquet 모드 중에서 진행되는 고차 모드는 15 GHz 이상의 주파수에서 발생하게 된다. 본 논문에서 계산하고자 하는 주파수 영역은 10 GHz를 초과하지 않으므로 기본 모드인 00모드만이 진행 모드가 된다. 입사 전력(S_i)과 계산된 반사파를 이용하여 반사 전력(S_r) 및 반사 계수(Γ)를 구하면 다음과 같다.

$$\mathbf{E}_r = \mathbf{E}_\omega = a^{-2} \int_{Area} \mathbf{E}(x', y', z = z_r) dx' dy' \quad (9)$$

$$\mathbf{H}_r = \mathbf{H}_\omega = a^{-2} \int_{Area} \mathbf{H}(x', y', z = z_r) dx' dy' \quad (10)$$

$$S_r = \frac{1}{2} \text{Re}(\mathbf{E}_r \times \mathbf{H}_r^*) \quad (11)$$

$$S_i = \frac{1}{2} \text{Re}(\mathbf{E}_i \times \mathbf{H}_i^*) \quad (12)$$

$$\Gamma = \sqrt{\frac{S_r}{S_i}} \quad (13)$$

격자형 페라이트 전파흡수체의 반사 손실을 계산하기 전에 우선, 기하학적 형태가 가장 간단한 평판형 페라이트 전파흡수체의 반사 손실을 계산하였다. 계산에 사용된 평판형 전파흡수체는 현재 국내의 삼화전자(주)에서 제작하는 평판형 전파흡수체(모델명 SFA)이다. SFA는 두께가 7.6 mm인 Ni Zn 페라이트로 구성되어 있고, 그 물성은 $K=2000$, $f_r=2.5$ MHz 및 $\epsilon_r=12.8$ 이다. 위의 모델링 파라미터로 FDTD 격자의 크기를 0.744 mm, 시간 간격을 1.4 ps로 하여, Gaussian 펄스파를 페라이트 평판에 수직 입사시켜 20만 시간 스텝을 계산하면 그림 4와 같다. 그림 4에서 알 수 있듯이 평판형 페라이트 전파흡수체의 완전해와 FDTD 방법을 이용한 계산 결과가 매우 잘 일치함을 알 수 있다.

FDTD방법을 이용하여 격자형 페라이트 전파흡수체 FFG-1000의 반사 손실을 계산하면 그림 5와 같다. 이 경우 FDTD 격자의 크기를 0.83~0.95

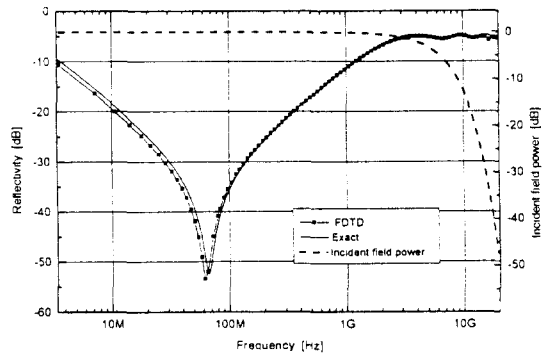


그림 4. 평판형 페라이트 전파흡수체의 반사 계수와 입사파 전력(SFA : $t=7.6$ mm)

Fig. 4. The Reflectivity of the flat tile ferrite absorber and incident field power(SFA : $t=7.6$ mm).

mm로 페라이트 부분과 공기 부분의 격자 크기를 서로 다르게 하여 계산의 정확도를 높였으며, 시간 간격을 1.65 ps로 하여 6만 시간 스텝을 계산하였다. 그림 5의 계산 결과는 입사파의 전력 분포에서 알 수 있듯이 약 10 GHz까지 신뢰할 수 있다. 그림 5에서 알 수 있듯이 반사 손실이 최소가 되는 부분과 고주파 영역에서 약간의 차이가 보이나 FDTD 방법과 Hashin-Shtrikman 방법을 이용한 균질화 방법의 계산 결과가 거의 일치함을 알 수 있다.

격자형 페라이트 전파흡수체의 측정은 TEM 모드가 생성되는 원통형 동축도파관을 이용하여 그림 6과 같이 측정한다^[10]. 격자형 페라이트 전파흡수체의 반사 손실을 원통형 동축 도파관으로 측정하기 어렵기 때문에, 그림 6과 같이 격자형 페라이트 전파흡수체의 페라이트와 공기의 체적비가 같은 원통형 동축 도파관 모양의 페라이트 전파흡수체를

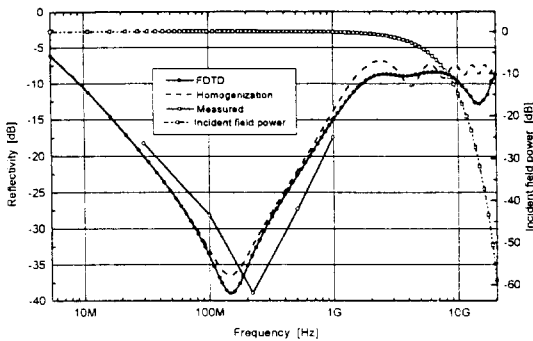


그림 5. 격자형 페라이트 전파흡수체의 반사 계수와 입사파 전력(FFG-1000 : $a=20$ mm, $b=13.4$ mm, $t=19$ mm)

Fig. 5. The reflectivity of the grid ferrite absorber and incident field power(FFG-1000 : $a=20$ mm, $b=13.4$ mm, $t=19$ mm).

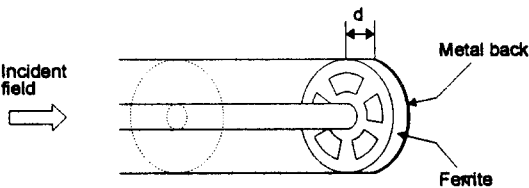


그림 6. 격자형 페라이트 전파흡수체의 반사 계수 측정
Fig. 6. Measurement of the reflectivity of a grid ferrite absorber.

제작하여 도파관 말단에 삽입한 후, 전파흡수체의 반사 손실을 측정한다. 피측정 전파흡수체의 형태와 실제 격자형 페라이트 전파흡수체의 형태에 차이가 있지만, 균질화 방법에 의하면 도파관 모양의 페라이트 전파흡수체와 격자형 페라이트 전파흡수체의 페라이트와 공기의 체적비를 동일하게 조정하면 동일한 특성을 가진다고 볼 수 있으므로 측정된 결과와 격자형 페라이트 전파흡수체의 반사 손실이 동일하다고 볼 수 있다. 그러나, 그림 5에 의하면 이렇게 측정된 결과는 FDTD 방법뿐만 아니라 균질화 방법과도 어느 정도 차이가 난다. 이와 같은 현상은 두 전파흡수체의 기하학적 모양이 서로 다르기 때문일 것으로 사료된다.

FFG-1000이 아닌 임의의 페라이트 전파흡수체의 경우에 FDTD 방법과 균질화 방법을 비교하기 위하여 물성은 FFG-1000과 같지만 두께가 19 mm이고 $a=20$ mm, $b=13.8$ mm인 경우의 반사 손실을 계산하면 그림 7과 같다. 이 전파흡수체는 FFG-1000과 비교하여 개구부의 크기가 0.4 mm 밖에 차이가 나지 않고 페라이트와 공기의 부피 비도 0.476으로서 FFG-1000과 유사하다. 그러나 그림 7의 계산 결과는 그림 5에서 보인 것만큼 두 방법이 일치하지는 않는다. 전파흡수체의 특성 기준이 되는 흡수 대역폭은 두 방법이 일치하지만 반사 손실이 최소가 되는 부분의 특성에서는 많은 차이가 난

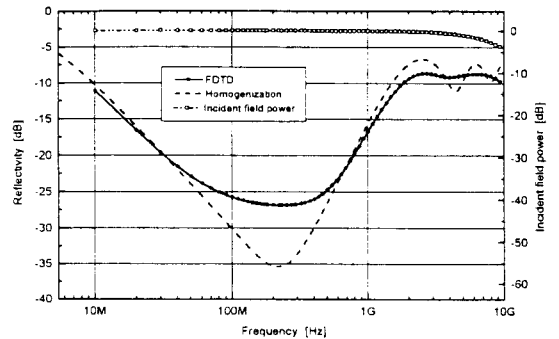


그림 7. 임의의 격자형 페라이트 전파흡수체의 반사 계수와 입사파 전력($a=20$ mm, $b=13.8$ mm, $t=19$ mm)

Fig. 7. The reflectivity of a grid ferrite absorber and incident field power($a=20$ mm, $b=13.8$ mm, $t=19$ mm).

다. 이와 같은 차이는 FDTD 방법은 매질의 구조 변화를 민감하게 해석할 수 있지만 균질화 방법은 매질의 구조적 특성을 계산에 쉽게 포함시킬 수 없기 때문일 것으로 사료된다.

IV. 결 론

본 논문에서는 전자파 장해 및 전자파 내성 시험용 전자파 무반사실에 널리 사용되는 격자형 페라이트 전파흡수체의 반사 손실을 계산하기 위하여 FFG-1000을 중심으로 균질화 방법과 FDTD 방법을 비교 검토하였다. ADE 방법을 응용하여 전계와 자계 외에 자속을 추가로 이용하여 페라이트 매질 특성 및 경계 조건을 모델링 하였다. FDTD 방법과 균질화 방법의 계산 결과가 매우 잘 일치함을 알 수 있었다. 균질화 방법은 저주파수 근사 방법으로서 매질의 상대적 비율만 고려하여 계산하지만, 본 논문의 방법은 매질의 기하학적 형태와 특성을 모두 고려하기 때문에 더 정확한 특성 평가가 가능할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] C. L. Holloway, R. R. Delyser, R. F. German and P. McKenna, M. Kanada, "Comparison of electromagnetic absorber used in anechoic and semi-anechoic chambers for emissions and immunity testing of digital devices," *IEEE Trans. Electromag. Compat.*, vol. 39, pp. 33-47, Feb. 1997.
- [2] 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.
- [3] E. F. Kuester and C. L. Holloway, "Improved low-frequency performance of pyramid-cone absorbers for application in semi-anechoic chambers," in *Proc. 1989 IEEE Nat. Symp. Electromag. Compat.*, Denver, CO May 23-25, pp. 300-306, 1989.
- [4] E. F. Kuester and C. L. Holloway, "A low-frequency model for wedge or pyramis absorber arrays-I," *IEEE Trans. Electromag. Compat.*, vol. 36, pp. 300-306, Nov. 1994.
- [5] D. Y. Kim and Y. C. Chung, "Electromagnetic wave absorbing characteristics of Ni-Zn ferrite grid absorber," *IEEE Trans. Microwave Theory Technol.*, vol. 45, pp. 356-361, Sep. 1997.
- [6] Allen Taflove, *Computational Electrodynamics The Finite Difference Time Domain Method*, Artech House, 1995.
- [7] W. J. Tsay and D. M. Pozar, "Application of the FDTD technique to periodic problems in scattering and radiation," *IEEE Microwave Guided Wave Lett.*, vol. 3, pp. 250-252, 1993.
- [8] P. Harms, R. Mittra and W. Ko, "Implementation of the periodic boundary condition in the finite-difference time-domain algorithm for FSS structures," *IEEE Trans. Antenna and Propag.*, vol. 42, pp. 1317-1324, Sept. 1994.
- [9] A. Alexanian, N. J. Koliass, R. C. Compton and R. A. York, "Three-dimensional FDTD analysis of quasi-optical arrays using Floquet boundary conditions and Berenger's PML," *IEEE Microwave Guided Wave Lett.*, vol. 6, pp. 138-140, 1996.
- [10] "Measured technical data TOYO FFG-1000 ferrite grid absorber," *TOYO Corporation, Tech. Rep.*, p. 7, 1996.

이 재 용



1969년 8월 1일생
1992년 2월 : 한양대학교 전자통신공학과 졸업(공학사)
1994년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학석사)
1994년 3월~현재 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사과정

[주 관심분야] 전파전파 및 산란 해석, 이동통신, EMI / EMC 등

명 노 훈



1976년 2월 : 서울대학교 전기공학과 졸업(공학사)
1982년 12월 : Ohio State Univ. 전기공학과 졸업(공학석사)
1986년 8월 : Ohio State Univ. 전기공학과 졸업(공학박사)

1986년 9월~현재 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 교수
[주 관심분야] 전파전파 및 산란 해석, 마이크로파공학, 이동 및 위성통신, EMI / EMC / EMS 등

정 연 춘



1960년 12월 8일생
1984년 2월 : 경북대학교 물리학과 졸업(이학사)
1986년 2월 : 경북대학교 대학원 물리학과 졸업(이학석사)
1996년 3월~현재 : 충남대학교 전자공학과 박사과정

1985년 12월~현재 : 한국표준과학연구원 전자기연구부 전자기 환경그룹 그룹장
1996년 6월~현재 : CISPR working group member
[주 관심분야] EMI / EMC, 전자파 재료 등