

# 등가재료정수법 및 FDTD법에 의한 단일편파용 광대역 전파흡수체의 해석

## Analysis of Broad-Band Electromagnetic Wave Absorber for Single Polarized Wave by the Equivalent Material Method and the FDTD Method

이수영\* · 김동일\*\* · 이종헌\*\*\*

Su-Young Lee\* · Dong-Il Kim\* · Jong-Heon Lee\*\*\*

### 요 약

TV파와 같은 수평편파용 광대역 전파흡수체를 설계하기 위해 평판 페라이트층 위에 핀형 페라이트를 적층한 전파흡수체를 제안하였다. 제안한 전파흡수체를 등가재료정수법<sup>[1]</sup>을 이용하여 최적 치수를 구하고, 이 때의 전파흡수능을 기존의 흡수체의 흡수능과 비교하였다. 등가재료정수법이라는 근사법의 타당성을 확인하기 위하여 Hashin-Strikman의 경계치를 이용한 경우의 실효유전율과 비교하였다.

나아가서, 등가재료정수법에 의한 전파흡수능과 도파관모델로 근사하여 FDTD법으로 구한 전파흡수능을 비교한 결과, 이들은 서로 잘 일치함을 확인하였다. 따라서, 제안한 단일편파용 전파흡수체는 30 MHz~5830 MHz의 광대역 특성을 가지며, 이러한 구조의 전파흡수체를 설계 또는 해석하는 데에는 등가재료정수법으로도 충분히 유효함이 입증되었다.

### Abstract

A design method of an electromagnetic wave absorber with ferrite fins in the second layer, which has very wide band frequency characteristics and is used for single-polarized wave absorption such as TV wave etc, has been designed. To examine the effectiveness of the Equivalent Material Constants Method(EMCM)<sup>[1]</sup> which is approximate method, the effective complex permittivity calculated by the Hashin-Strikman formulas and the EMCM are compared.

Since, furthermore, the reflectivities by the EMCM in space and the FDTD method in a rectangular waveguide agreed well each other, it has been confirmed that the proposed electromagnetic wave absorber has excellent absorption characteristics in the frequency range of 30 MHz to 5830 MHz. Thus, it can be concluded that the EMCM is useful to design and analyze the electro-magnetic wave absorber proposed here.

†이 연구는 1997년도 한국과학재단 특정기초연구지원(과제번호 : 97-01-01-04-01-2)에 의해 이루어졌음.

\*경남전문대학 전자과(Department of Electronics, Kyungnam College)

\*\*한국해양대학교 전파공학과(Dept. of Radio Sciences & Eng., Korea Maritime Univ.)

\*\*\*동아대학교 전자공학과(Dept. of Electronics, Dong-A Univ.)

· 논문 번호 : 971106-079

· 수정완료일자 : 1998년 4월 24일

## I. 서 론

전자파환경(Electromagnetic Wave Environments)이 점차 폭주함에 따라 목적하지 않는 전자파에 의하여 방해에 부딪히고 또 반대로 스스로가 불필요한 전자파를 방사하여 방해를 하고 있는 경우가 많아져, 불필요한 전자파를 억제하는 일이 중요한 과제로 되고 있다. 이에 따라 전파흡수체의 용도도 다양해져서, 측정용 전파암실을 비롯하여 TV의 고스트 방지대책, 레이더파흡수체, 나아가서 전자렌지(Microwave Oven)나 각종 OA기기로부터 누설되는 전자파를 억제하는 목적 등으로 전파흡수체가 최근 적극 활용되고 있다.

한편, 제2차 세계대전 중 잠수함이나 비행기 가 레이더에 탐지되지 않도록 하기 위하여 전파흡수체의 이용이 시도된 이래, 최근에는 교량 또는 선박의 마스트 등에 의한 레이더의 허상방지용 전파흡수체, 군사적으로는 레이더에 탐지되지 않는 전함 또는 항공기의 제작을 위한 전파흡수체의 개발이 미국, 일본을 비롯한 선진국을 중심으로 활발히 이루어지고 있다. 최근 정보화사회의 발전 및 전파 유효이용에 따라 전자기기가 고주파화, 디지털화, 저전력화되고 있어 노이즈의 문제는 더욱 심각해져 가고 있다. 따라서, 국제적으로도 방사전자파 및 전자파내성에 대한 규제(예를 들면, FCC, ANSI, FTZ)가 엄격해져 가고 있다.

이와 같은 전파흡수체의 발전과정에 있어서, 특히 전자파 노이즈 측정용 전파암실이나 GTEM Cell, TV 고스트방지용 페라이트 전파흡수체로 페라이트 타일이라 불리는 전파흡수체가 개발되어 사용되어 오고 있으나, 그 대역폭이 불과 30~400 MHz 정도에 불과하므로 FCC 또는 ANSI의 규격을 만족시키기에는 매우 미흡한 실정이다. Grid형 페라이트 전파흡수체는 30~780 MHz 정도의 대역폭을 가지나 역시 ANSI 등에서 요구하는 30~1000 MHz의 주파수 대역을 cover하기에는 미흡한 실정이다<sup>[2],[3]</sup>.

본 논문에서는 이용 가능한 주파수 범위가 광대역이며 제작이 용이한 전파흡수체를 개발하기 위하여 1층에 타일형 페라이트를 배치하고 제2층에 핀(Fin)형 페라이트를 적층한 단일편파(Single Polarized Wave)용 페라이트 전파흡수체를 제안하였다. 제안한 전파흡수체의 최적 치수를 등가재료정수법에 의하여 설계하였으나 이것은 근사적인 방법이므로 이의 정확성을 평가할 필요가 있다.

따라서, 전파흡수체의 등가재료정수법에 의한 실효유전율을 Hashin-Shtrikman(HS)의 경계치를 이용한 실효유전율과 비교하여 서로 잘 일치함을 보였다. 나아가서, 도파관모델에 의한 FDTD(Finite Difference Time Domain)법을 이용하여 구한 전파흡수능과 등가재료정수법으로 계산한 전파흡수능이 서로 잘 일치함을 보임으로써 등가재료정수법의 유효성을 입증하였다.

## II. 등가재료정수법

그림 1은 본 논문에서 제안한 광대역 전파흡수체의 외양이다. 제안한 전파흡수체는 페라이트만으로 구성되어 있으며, 단면도는 그림 2와 같다. 각 층의 실효 유전율과 투자율을 등가재료정수법을 이용하여 구할 수 있다<sup>[1],[4]</sup>.

손실이 있는 유전체와 전자파의 상호관계를 나타

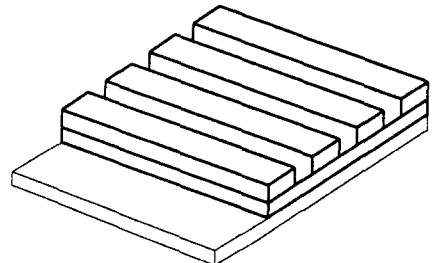


그림 1. 제안한 광대역전파흡수체의 모양  
Fig. 1. The typical shape of a wide-band ferrite electromagnetic wave absorber proposed in this paper.

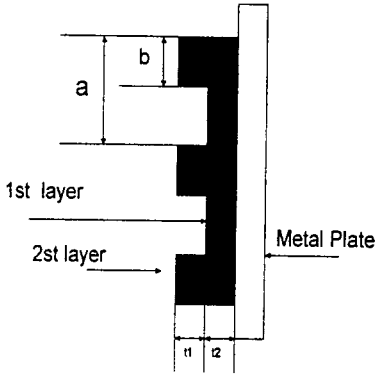
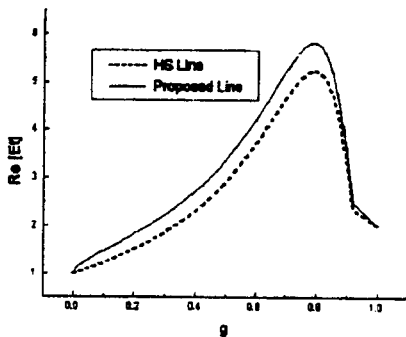


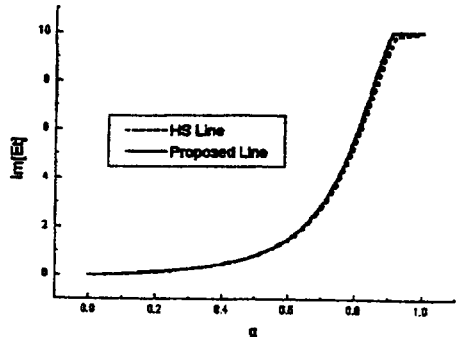
그림 2. 그림 1의 단면도  
Fig. 2. Cross section of Fig. 1.

내는 방법으로 Hashin-Shtrikman(HS) bounds 가 사용된다<sup>[5],[6]</sup>. 최악의 경우, Hashin-Shtrikman(HS)의 하한치는 약 4%의 오차를 가지는 것으로 알려져 있다. 한편, Hashin-Shtrikman의 하한치는 다음과 같이 쓸 수 있다<sup>[7]</sup>.

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



(a) 실수부  
(a) The real part



(b) 허수부  
(b) The imaginary part

그림 3. 제안한 모델의 등가유전율과 HS하한치 비교,  $\epsilon_r=(2-j10)$

Fig. 3. Comparison HS lower bounds with equivalent permittivity by the proposed model,  $\epsilon_r=(2-j10)$ .

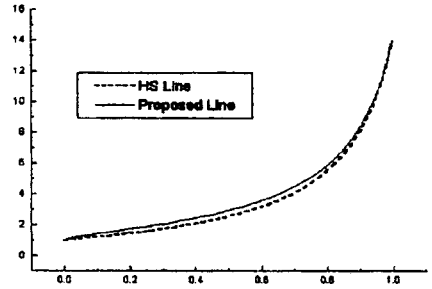


그림 4. 제안한 모델의 등가유전율(실수부)와 HS하한치 비교,  $\epsilon_r=(14-j0)$

Fig. 4. Comparison HS lower bounds with equivalent permittivity by the proposed model,  $\epsilon_r=(14-j0)$ .

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

그림 3과 그림 4는 Hashin-Shtrikman(HS)의 하한치에 의한 유전율과 등가재료정수법으로 구한 등가유전율을 비교한 것이다. 여기서, 그림 3은 손실이 있는 유전체에서 유전율이 복소수인 경우이고, 그림 4는 유전체의 유전율이 실수인 경우를 비교한 것으로 두 경우 모두 체적비에 따른 실효유전

율이 거의 일치함을 알 수 있다. 2층 편페라이트의 체적에 따른 실효유전율이 일치하므로, 등가재료정수법에 의하여 제안한 형식의 전파흡수체를 설계하는 것은 무리가 없음을 밝혔다.

설계방법으로서는 허용반사계수를  $|S_0|$ 라고 했을 때, 요구되는 반사계수  $S_n$ 에 대하여  $S_n \leq |S_0|$ 을 조건으로 하여 최소의 두께로 최대의 주파수 대역폭을 가지는 페라이트흡수체를 설계한다. 여기서,  $S_n$ 은  $-20$  dB로 하였다. 즉, 전체 두께를 최소로 하여 20 dB 이상의 반사감쇠량을 가지는 주파수 대역폭이 최대가 되도록 각 층의 두께 및 치수를 정한다. 즉, 전파흡수체의 공간적 형상을 변형시키는 기법<sup>[1],[4]</sup>을 이용하여 유전율과 투자율을 제어할 수 있기 때문에 광대역 전파흡수체의 설계가 가능해진다.<sup>[1],[8],[9]</sup>

각 층의 두께와 편형 페라이트 전파흡수체의 치수를 표 1과 같이 선택함으로써, 수평편파의 경우 최저 30 MHz에서 최고 5830 MHz까지 반사감쇠량 20 dB 이상을 만족하는 흡수체를 설계할 수 있었다. 그림 5는 Fin형 광대역 페라이트 전파흡수체의 주파수 특성의 등가재료정수법에 의한 이론치를 보이고 있다. 이론치의 계산에 사용한 페라이트의 재료정수는 비유전율  $\epsilon_r = 14$ , 초투자율  $\mu = 2,000$ , 완화주파수  $f_c = 3$  MHz로 하였으며, 투자율에 관한 주파수 분산식은 Naito의 분산식<sup>[8]</sup>을 이용하였다. 그림 5에서 알 수 있듯이, 반사감쇠량을 20 dB 이상으로 하는 규정치를 만족하는 주파수 영역은

표 1. 제안한 편형 흡수체의 치수

Table 1. The dimensions of proposed FIN-type absorber.

	치수 (mm)	20 dB 이상의 전파흡수 대역폭
주기(a)	20.0	"
페라이트의 폭(b)	8.0	30-5830
타일 페라이트의 두께( $t_1$ )	4	MHz
핀 페라이트의 두께( $t_2$ )	9	

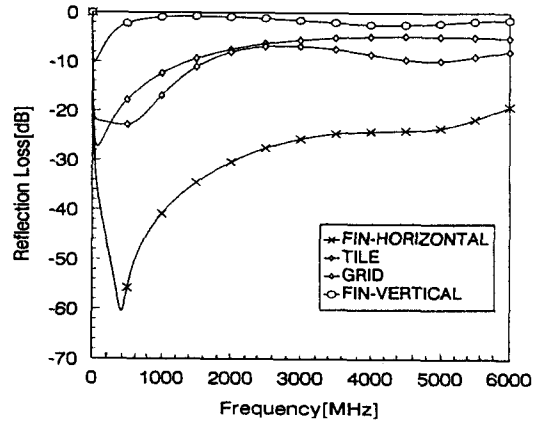


그림 5. 기존의 페라이트 전파흡수체와 제안한 광대역 전파흡수체의 주파수 특성비교

Fig. 5. Comparison conventional absorbers and proposed absorber for frequency characteristics.

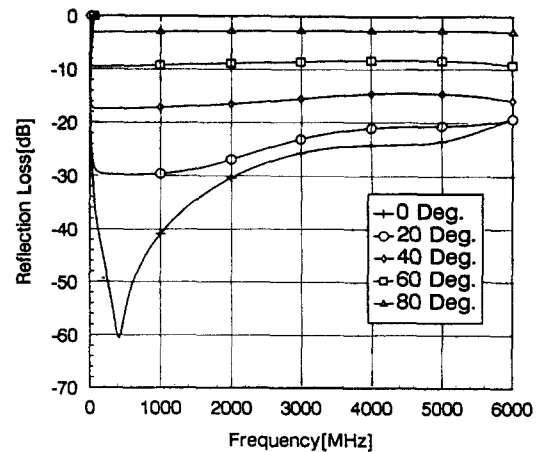


그림 6. 입사각에 따른 반사감쇠량

Fig. 6. Reflection loss according to the incident angles.

30~5,830 MHz까지로, 이는 단층 타일형 페라이트흡수체 및 격자형 페라이트흡수체와 비교하여 현저한 광대역 특성을 가진다.

그림 6은 입사각에 따른 반사감쇠량을 보이고 있

다.

### Ⅲ. FDTD 법을 이용한 전파흡수체 해석

본 논문에서 제안한 전파흡수체의 주파수에 따른 흡수능을 측정하기 위해 그림 7과 같이 TE<sub>10</sub> 모드가 전파되는 도파관모델을 이용하였고, 표 1에 있는 치수를 사용하였다<sup>[10]</sup>. 또한, 입력원으로는  $xy$  평면에  $E_y = \sin(\pi z/w)\sin(2\pi f n \Delta t)$ 인 전계를 인가하였다<sup>[11]</sup>. 도파관모델에서 중요한 변수인 관내파장의 계산은 자유공간의 파장  $\lambda$ 을 알기 때문에 다음 식을 이용하여 관내파장  $\lambda_g$ 을 계산하였다.

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - (\lambda/2w)^2}} \quad (2)$$

여기서,

$\lambda$  : 자유공간의 파장

$w$  : 도파관의 치수

흡수체 내에서의 파장은  $1/Re\{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}\}$ 로 되므로, 각 셀의 크기는 다음 식을 이용하여 결정하였다.

$$\Delta x = \Delta y = \Delta z = \lambda_g / [\alpha \cdot Re\{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}\}] \quad (3)$$

여기서,  $\alpha$ 는 임의의 정수로 10~20 사이의 정수이다.

흡수체표면에서의 유전율과 투자율을 다음과 같이 계산하였다<sup>[10]</sup>. 그림 8에서 e 경우, 경계면에서

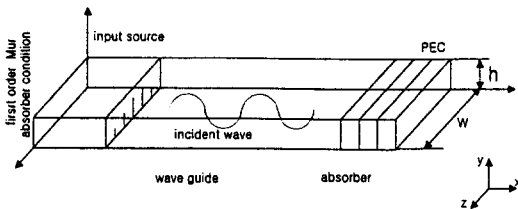


그림 7. 해석모델

Fig. 7. The analysis model.

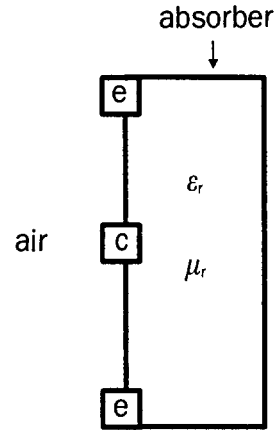


그림 8. 유전율 계산모델

Fig. 8. The calculation method of the permittivity.

의 유전율은 식 (4)와 같으며,

$$\epsilon_e = (1 + \epsilon_r) / 2 \quad (4)$$

c의 경우, 유전율은 식 (5)와 같이 계산하였다.

$$\epsilon_c = (3 + \epsilon_r) / 4 \quad (5)$$

여기서,  $\epsilon_r$ 은 전파흡수체의 비유전율로 이 경우는 14이다. 투자율의 경우에도 마찬가지로의 계산법을 적용하였다. 전파흡수능 계산에 사용한 변수를 1 GHz 단위로 표 2에 나타내었고, 전파흡수능의 계산은 0.5 GHz 단위로 하였다.

표 2에서는 관내파장  $\lambda_g$ 와 자유공간의 파장  $\lambda$ 가 거의 유사한 값을 가지도록 도파관의 치수  $w$ 를 선택하였고, 이때의 차단주파수도 함께 고려하였다. 도파관의 치수  $h$ 는 TE<sub>10</sub> 모드의 전파가 진행할 수 있도록 선택하는 한편, 전파흡수체의 배열을 고려하여 선택하였다. 이와 같은 도파관에 전파흡수체를 삽입하고, 배면을 금속판으로 단락시켰다. 이 경우, 도파관의 한쪽 개구부는 이 도파관이 무한장이

표 2. 해석에서 사용한 변수

Table 2. The paramers used in this analysis.

주파수 f (GHz)	1	2	3	4	5	6
$\alpha$	20	20	20	20	20	20
W(mm)	310	160	109	85	70	60
h(mm)	150	78	50	42	35	30
$\lambda_g$ (mm)	342.8	169.8	112.5	83.57	66.40	55.0
$\Delta x = \Delta y = \Delta z$ (mm)	4.58	2.27	1.5	1.12	0.88	0.73
$\Delta t (\times 10^{-12}\text{s})$	8.82	4.36	2.89	2.14	1.7	1.41
x축 격자수(개)	389	389	389	389	389	389
y축 격자수(개)	33	34	33	37	39	41
z축 격자수(개)	67	71	72	76	79	82

라고 가정하고, 1차 Mur 조건을 적용하였다<sup>[12]</sup>. 각각의 주파수에 대해 입사파의 위치를 달리함으로써 전파흡수체의 전면에서 입사파의 크기가 최대로 되게 하였다. 이와 같은 해석모델에 대해 도파관의 중앙부가  $z = W/2$ 임을 감안하여, 시간의 변화에 대해 x축상으로 생성되는  $E_y$ 의 정재파를 관측하였다.

그림 9는 본 논문에서 제안한 전파흡수체의 흡수능을 비교하기 위해 FDTD법을 이용하여 계산한 결과를 나타낸 것이다. 여기서는 1 GHz~6 GHz까지의 정재파를 비교하기 위해 1 GHz일 때의 전파흡수체 위치 150 cm를 기준으로 하였다. 주파수에 따라 정재파의 최대진폭과 최소진폭이 약간의 차이를 나타내며, 전파흡수체의 전면에서 생기는 최소점의 위치 또한 약간의 차이를 보이고 있다. 이는 제안한 전파흡수체의 치수와 FDTD계산에서의 cell 간격, 전파흡수체의 두께 및 각 주파수에 대한 파장의 차이에 기인한 것이다. 유전체의 비유전율이 높은 경우 수치오차가 상당히 적기 때문에, 이러한 수치분산을 줄이는 방법은 차후의 과제로 남겨두었다.

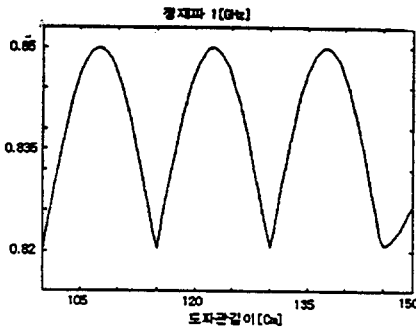
한편, 그림 10에서는 FDTD법으로 계산한 흡수능과 등가재료정수법으로 구한 흡수능을 비교하였다. 비록, FDTD계산에서는 주파수 대역이 1 GHz

~6 GHz까지의 대역에서만 흡수능을 계산하였지만, FDTD법으로 계산한 흡수능과 등가재료정수법으로 구한 흡수능이 거의 일치하고 있음을 알 수 있다.

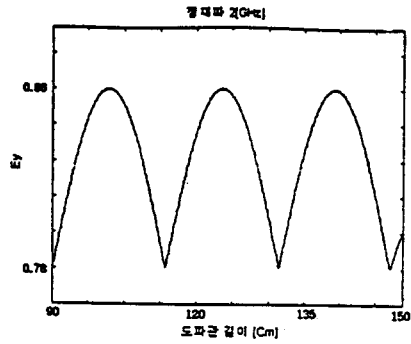
#### IV. 결 론

본 논문에서는 TV파나 레이다파에 적용할 수 있는 수평편파용 광대역 전파흡수체를 제안하고 등가재료정수법을 이용하여 제안한 전파흡수체의 최적치수와 흡수능을 계산하였다. 결과, 2층 핀구조 페라이트의 간격이 20.0 mm, 폭이 8.0 mm, 두께가 4 mm, 9 mm일 때 20 dB의 흡수능을 가지는 주파수 대역이 30 MHz~5830 MHz였다.

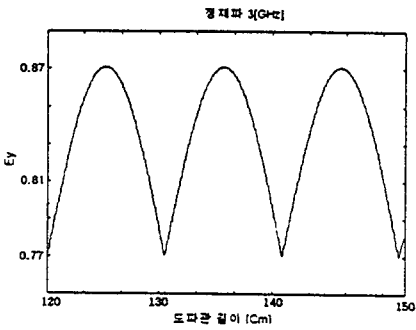
등가재료정수법으로 구한 등가유전율과 Hashin-Shtrikman의 하한치에 의한 유전율이 거의 일치함을 보임으로써 등가재료정수법에 의한 2층 핀형 전파흡수체설계가 타당함을 보였다. Hashin-Shtrikman의 하한치는 등가재료정수법으로 구한 격자형 페라이트 전파흡수체와 거의 유사한 주파수 특성을 가지고 있기 때문에 전파흡수체의 형상과 구성성분을 알면 실제적인 특성을 예상할 수 있다. 그러나, 등가재료정수법과 Hashin-Shtrikman의 하한치는 전파흡수체와 전자파 사이의 상호관계를 간접적



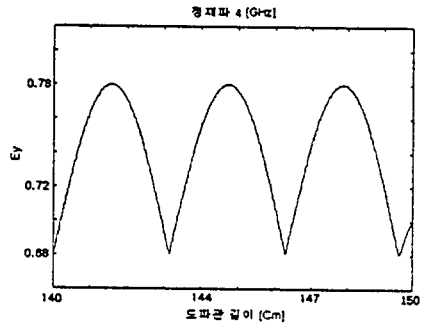
(a) In the Case of 1 GHz.



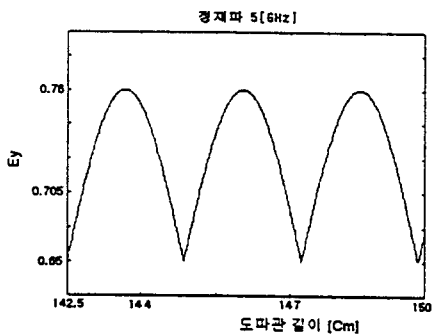
(b) In the Case of 2 GHz.



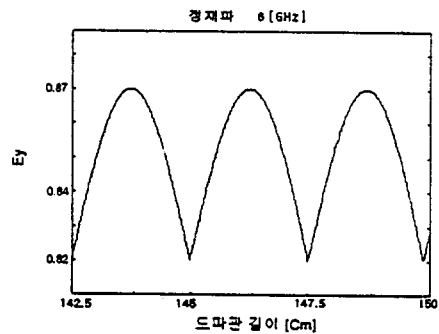
(c) In the Case of 3 GHz.



(d) In the Case of 4 GHz.



(e) In the Case of 5 GHz.



(f) In the Case of 6 GHz.

그림 9. FDTD법으로 계산된 정재파형태

Fig. 9. Standing wave patterns calculated by FDTD method.

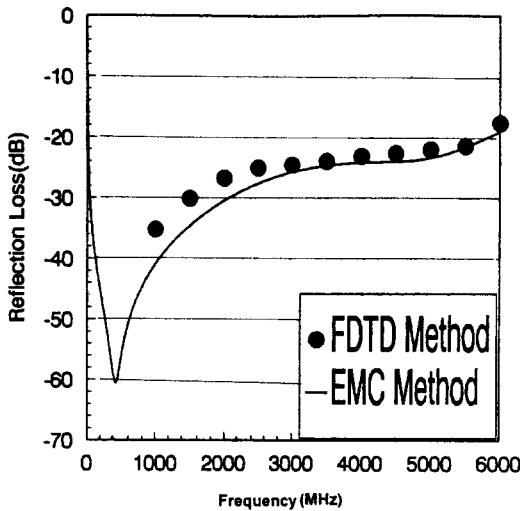


그림 10. 흡수능 비교

Fig. 10. Comparison of reflection losses.

으로 나타내는 방법이므로 이러한 관계를 직접 표현하기 위해 FDTD법 등에 의한 계산이 요구된다.

FDTD법을 이용한 경우 -20 dB의 허용반사계수를 만족하는 주파수 대역이 1 GHz에서 6 GHz로 등가 재료정수법으로 구한 주파수 대역과 거의 일치함을 확인하였다. 따라서, 전파흡수체를 설계하거나 해석하는 데 있어서는 등가재료정수법만으로도 충분하다는 것을 알 수 있었다.

### 참고문헌

- [1] Dong Il Kim, M. Takahash, H. Anzai, Sang Yup Jun, "Electromagnetic wave absorber with wide-band frequency characteristics using exponentially tapered ferrite", *IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility*, vol. 38, no. 2, pp. 173-177, May 1996.
- [2] Y. Naito et al., "Design of the grid type ferrite electromagnetic wave absorber," *EMCJ 91-81, IEICE of Japan*, pp. 21-28, Jan. 1992.
- [3] 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.
- [4] 김동일, 이수영, 정세모, "단일 편파용 광대역 전파흡수체의 설계에 관한 연구", *한국항해학회지*, 제19권, 제4호, pp. 93-102, Nov. 1995.
- [5] 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.
- [6] J. I. Jackson and S. R. Coriell, "Transport coefficients of composit materials", *J. Appl. Phys.*, vol. 39, pp. 2349-2354, 1968.
- [7] 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.
- [8] Y. Naito, "Formulation of frequency dispersion of ferrite permeability", *IECE of Japan*, vol. J59-C, no. 5, pp. 297-304, May 1976.
- [9] Y. Naito, *Electromagnetic wave absorber*, OHM Publishing Co., Japan, 1987.
- [10] 橋本 修 外, *FDTD時間領域差分法入門*, 林北出版株式會社, 1993.
- [11] Karl S. Kunz and Raymond J. Liebbbers, "The finite difference time domain method for electromagnetics", Miami, Florida: CRC Press,inc., 1993.
- [12] G. Mur, "Absorbing boundary conditions for the finite-difference approximation of the time-domain electromagnetic field



equations”, *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* vol. EMC-23, pp. 377-382, 1981.

이 수 영



1963년 2월 25일생  
1985년 2월 : 동아대학교 전자과(공학사)  
1987년 2월 : 동아대학교 대학원 전자공학 전공(공학석사)  
1991년 3월~1994년 3월 : 동아대학

교 전자과 박사과정 수료

1995년 3월~현재 : 경남전문대학교 전자과 전임강사

[주 관심분야] 마이크로파 공학, 초고주파 회로 설계

이 중 헌



1933년 12월 25일생  
1960년 2월 : 동아대학교 물리과 졸업  
1964년 2월~1966년 8월 : 동아대학교 문과대학 전임강사  
1966년 9월~현재 : 동아대학교 전

자 공학과 교수

[주 관심분야] 물리전자 공학, 재료공학

김 동 일



1952년 2월 26일생  
1975년 2월 : 한국해양대학교 항해학과(공학사)  
1977년 2월 : 한국해양대학교 대학원 전파공학전공(공학석사)  
1984년 3월 : 일본 동경공업대학 대

학원 전기전자공학과(공학박사)

1975년 3월~1993년 9월 : 한국해양대학교 전자통신공학과 조교~부교수

1993년 10월~현재 : 한국해양대학교 전파공학과 교수

1990년 3월 10일 : 산학협동상 대상 수상

1993년 12월 11일 : 본 학회 학술상 수상

1995년 4월 21일 : 과학기술진흥 대통령 표창 수상

1996년~현재 : 본 학회 영남지부장

[주 관심분야] 마이크로파 및 밀리미터파 회로의 설계, CATV 전송회로의 설계, 고성능 전파흡수체의 개발, EMI/EMC 대책 등