

# 전파흡수체 설계에 있어서 전송선로 근사방법의 적용 한계

## Application Limits of Transmission Line Approximations for Design of Electromagnetic Absorbers

정연춘\* · 김병욱\* · 박동철\*\*

Yeon-Choon Chung\* · Byung-Wook Kim\* · Dong-Chul Park\*\*

### 요 약

전파흡수체의 전자파산란 문제는 전송선로 근사방법과 유효매질 이론을 적용하여 매우 간단하게 표현할 수 있다. 이러한 방법은 전자장 수치해석 방법이 엄청난 계산이 필요한 것에 비해 매우 직관적이고, 간단하므로 전파흡수체 설계에 널리 사용되어져 왔다. 이 논문에서는 이러한 방법 자체가 가지는 근사의 한계 때문에 발생하는 적용한계를 유한요소법을 이용하여 검토하였다. 전송선로 근사방법은  $\lambda \geq 2p$ 인 영역(여기에서,  $p$ 는 전파흡수체의 배열주기,  $\lambda$ 는 관심주파수 상한에서의 파장)에서 유효하다. 따라서 높은 물성을 갖거나 물리적 크기가 큰 구조의 전파흡수체는 흔히 이러한 조건을 만족치 않으며, 전자파 산란을 직접 수치해석적으로 계산해야 한다.

### Abstract

The scattering problems from electromagnetic absorbers can be greatly simplified using the transmission line approximations (TLA) and effective medium theory. This method has been widely used for the absorber design because of its very simple calculation and intuitional approach, while numerical analysis needs the tremendous computation requirements. This paper examined the accuracy and limitations originated by the intrinsic approximation limits of TLA by comparison with FEM results for various absorber design examples. It was found that the TLA result is valid when  $\lambda \geq 2p$ , where  $\lambda$  is the wavelength of the interested upper frequency and  $p$  is the distance between two periodic cone arrays. Therefore, the electromagnetic absorbers having high material properties and big base-area commonly do not meet this condition, and the electromagnetic scattering from those absorbers must be evaluated by the numerical analysis in those cases.

\*한국표준과학연구원 전자기환경그룹(EMC Group, Korea Research Institute of Standards and Science)

\*\*충남대학교 전파공학과(Department of Radio Science and Engineering, Chungnam National University)

· 논문 번호 : 990219-015

· 수정완료일자 : 1999년 4월 19일

## I. 서 론

전파흡수체의 전자파산란 문제를 해석하기 위해서는 유한요소법(FEM)<sup>[1]</sup>, 주파수영역 유한차분법(FDFD)<sup>[2]</sup>, 시간영역 유한차분법(FDTD)<sup>[3]</sup>, 모멘트법<sup>[4],[5]</sup> 등을 이용하여 직접 풀이하는 방법이 있으나, 막대한 계산비용을 필요로 하기 때문에 여러 가지 어려움이 있다. 이러한 방법은 전파흡수체의 형상과 물성 변화에 따라 막대한 계산을 반복해야 하고, 또한 컴퓨터의 계산용량에 제한되어 큰 전파흡수체를 해석하기가 곤란하다. 그러나 이러한 문제는 무한한 크기의 주기적인 전파흡수체에 Floquet 정리<sup>[6]</sup>를 도입하고, 주기적인 평면에서 유효매질(effective medium) 이론<sup>[7]</sup>을 적용하여 매질 분포를 균질화시킨 다음, 본래의 문제를 주기적인 평면에 수직한 방향으로 불균일한 등가 전송선로 문제로 간략화시킬 수 있다. 이러한 방법을 본 논문에서는 전송선로 근사 방법이라고 부르며, 다양한 구조와 다양한 물성에서 쉽게 전파흡수체의 반사손실을 계산할 수 있는 장점이 있다. 최근의 대부분의 전파흡수체 설계<sup>[8]~[10]</sup>는 거의 이 방법으로 이루어졌다고 해도 과언이 아니다.

그러나 이러한 방법은 저자가 제안한 페라이트/페라이트 하이브리드 구조 전파흡수체<sup>[11]</sup>의 전자파산란을 수치해석적으로 계산하는 과정에서 적용의 한계가 있음을 확인하였다. 그동안 이러한 방법의 적용한계가 보고되지 않았던 이유는 기존의 썰기형 및 피라미드형 전파흡수체가 스티로폼(styrofoam)이나 폴리우레탄 폼(polyurethane foam)에 카본이나 페라이트 분말을 소량 함침시키기 때문에 복합체 자체의 물성상수 값이 매우 낮고, 따라서 전송선로 근사방법으로 전파흡수체의 반사손실을 잘 예측해왔기 때문인 것으로 이해된다. 그러나 이러한 방법은 새로운 광대역 흡수체인 페라이트/페라이트 하이브리드 구조 전파흡수체에서 처럼 물성상수 값이 높은 경우에는 반사손실을 정확히 예측할 수 없으

며, 단지 경향성만 이해할 수 있었다.

본 논문에서는 전송선로 근사방법에 의한 전파흡수체 설계 이론을 설명하고, 피라미드형 전파흡수체의 물성을 변화시켜 가면서 유한요소법으로 계산한 결과와 전송선로 근사방법으로 계산한 결과를 비교하여 전송선로 근사방법의 적용한계를 검토한 결과를 기술한다.

## II. 전송선로 근사방법을 이용한 전파흡수체 특성 해석

무한한 크기의 주기적인 전파흡수체에 시간조화( $e^{j\omega t}$ ) 평면파가 입사할 때 산란되는 전자장을 해석하기 위해서 Floquet 정리<sup>[6]</sup>를 이용할 수 있다. Floquet 정리는 주기적인 구조에서의 전자장은 구조의 주기성을 가지는 주기적인 벡터 함수에 의해 변조된 횡방향으로 전파하는 평면파의 형태로 기술될 수 있다는 것을 말한다. 전송선로 근사방법은 주기적인 평면에서 유효매질 이론을 적용하여 매질 분포를 균질화시킨 다음, 본래의 문제를 주기적인 평면에 수직한 방향으로 불균일한 등가 전송선로 문제로 간략화시킨다.

그동안 이러한 접근은 Bucci 등<sup>[12]</sup>이 도파관 이론을 유추하여 주파수에 의존하는 유효매질을 유도하고, 썰기형 전파흡수체의 수직입사 산란 특성에 대한 전송선로 근사 해석법을 제시한 바 있으며, Kuester와 Holloway<sup>[7]</sup>는 썰기형 및 피라미드형 전파흡수체의 경사입사(oblique incidence) 산란특성에 대한 보다 일반적인 접근방법으로 발전시켜 보고한 바 있다. 이러한 방법은 수치해석 방법에 비해 매우 간단하여 전파흡수체 설계를 최적화하는데 적합하기 때문에 많은 전파흡수체 연구자가 설계관점에서 매우 폭넓게 적용해왔다.

### 2-1 등가 전송선로 표현

피라미드형 전파흡수체의 전자파산란 문제에 전

송선로 근사방법을 적용하면 그림 1(a)와 같은 본래의 문제를 그림 1(b)와 같은 구조의 흡수체 재료와 공기로 이루어진  $N$ 개의 평면형 다층구조의 밀도경사(density gradient) 복합체의 문제로 근사할 수 있다. 이 때 결정되는 다층구조의 한 층의 높이  $d_i$ 는 물성상수 값이 급격히 변하지 않을 정도로 충분히 작게 결정되어야 한다. 본 연구에서는  $N = 500$ 으로서  $d_i = 0.051$  cm이며, 계산을 통해 수렴된 값을 얻을 수 있음을 확인하였다. 그림 1(b)의  $i$ 번째 평면층은  $i$ 번째 층의 두께  $d_i$ 와 복합체의 등가 복소유전율(equivalent complex permittivity)  $\epsilon_{ieq}$ 과 등가 복소투자율(equivalent complex permeability)  $\mu_{ieq}$ 에 의해 특징지어진다.

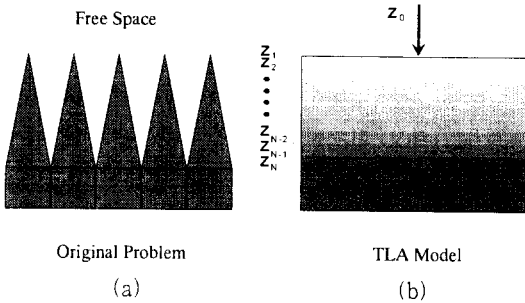


그림 1. 전송선로 근사 방법

(a) 실제 구조, (b) 등가 구조.

Fig. 1. Transmission line approximation.

(a) original problem,

(b) equivalent TLA model.

이와 같이 각각의 평면층은 각 층에서의 두께와 등가 복소유전율과 복소투자율로 나타낼 수 있으며, 이러한 과정을 통해 각 층에서의 입력 임피던스가 결정되고, 최상 평면층 표면에서의 입력 임피던스, 즉 피라미드형 전파흡수체의 입력 임피던스  $Z_1$ 이 계산된다. 이러한 값에는  $N$ 개의 전체 평면층에서의 입력 임피던스가 포함되어 있으며, 다음과 같은 순환공식(recurrence formula)에 의해 간단하게 표현될 수 있으며, 각 단에서의 입력 임피던스는 다음 식과 같다.

$$Z_1 = \eta_1 \frac{Z_2 \cosh \gamma_1 d_1 + \eta_1 \sinh \gamma_1 d_1}{\eta_1 \cosh \gamma_1 d_1 + Z_2 \sinh \gamma_1 d_1} \quad (1)$$

$$Z_2 = \eta_2 \frac{Z_3 \cosh \gamma_2 d_2 + \eta_2 \sinh \gamma_2 d_2}{\eta_2 \cosh \gamma_2 d_2 + Z_3 \sinh \gamma_2 d_2} \quad (2)$$

.....

$$Z_i = \eta_i \frac{Z_{i+1} \cosh \gamma_i d_i + \eta_i \sinh \gamma_i d_i}{\eta_i \cosh \gamma_i d_i + Z_{i+1} \sinh \gamma_i d_i} \quad (3)$$

.....

$$Z_{N-1} = \eta_{N-1} \frac{Z_N \cosh \gamma_{N-1} d_{N-1} + \eta_{N-1} \sinh \gamma_{N-1} d_{N-1}}{\eta_{N-1} \cosh \gamma_{N-1} d_{N-1} + Z_N \sinh \gamma_{N-1} d_{N-1}} \quad (4)$$

$$Z_N = \eta_N \tanh \gamma_N d_N \quad (5)$$

여기에서, 전파흡수체의 끝은 금속판으로 단락되어 있으므로  $Z_{N+1} = 0$ 이다. 또한  $\gamma_i$ 는  $i$ 번째 층의 복소 전파상수(complex propagation constant)이고,  $\eta_i$ 는 특성 임피던스(intrinsic impedance)이며, 다음과 같이 표현된다:

$$\gamma_i = j 2\pi f \sqrt{\mu_{ieq} \epsilon_{ieq}} \quad (6)$$

$$\eta_i = \sqrt{\frac{\mu_{ieq}}{\epsilon_{ieq}}} \quad (7)$$

위와 같은 과정을 통해 결과적으로 다층 평면형 전파흡수체에 수직으로 입사하는 전자파의 반사손실은 다음의 식으로 표현된다:

$$R.L.(dB) = 20 \log_{10} \left| \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0} \right| \quad (8)$$

여기에서  $Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} (= \eta_0)$ 는 공기 중에서의 평면파의 특성 임피던스이며,  $337 \Omega$ 의 값을 갖는다.

## 2-2 유효매질 이론의 적용

앞 절에서 우리는 그림 1(a)와 같은 피라미드형

전파흡수체를  $N$ 층의 밀도경사 2상(two-phase) 복합체로 이루어진 다층구조로 근사하였고, 각층의 복합체는 복합체를 구성하는 전파흡수체 재료와 공기의 전자기적 성질로부터 결정되는 등가 복소 유전율과 등가 복소투자율로 특징지을 수 있다고 하였다. 여기에서, 2상 복합체는 2가지의 서로 다른 재료가 섞인 복합체를 의미한다. 즉,  $i$ 번째 층에서의 등가 복소유전율  $\epsilon_{ieq}$ 와 등가 복소투자율  $\mu_{ieq}$ 는 단순한 공간 평균(spatial averages)으로 표현되지 않으며, 공기와 전파흡수체 재료 영역에서의 미세한 구조의 전자계 분포와 관련한 파라미터의 가중 평균(weighted averages)으로 표현된다. 여기에서, 본 논문에서 다루고 있는 피라미드형 전파흡수체는 전형적으로 폴리우레탄 폼에 카본 분말을 함침시켜 도전성 손실(conductive loss)을 가지므로 복소 비투자율은 1로 둘 수 있다.

Kuester와 Holloway<sup>[7]</sup>는 Hashin-Shtrikman 공식<sup>[13]</sup>을 이용하여 피라미드형 전파흡수체의 등가 유전율과 전기전도도를 계산하는 기법을 제안하였으며, Riccati 방정식을 이용하여 피라미드형 및 췌기형 전파흡수체 격자구조에 대한 반사손실을 시뮬레이션하고, 다양한 상용 전파흡수체의 실험 데이터와 비교하여 잘 일치함을 보였다. Hashin-Shtrikman 공식은 저주파수 한계(low frequency limit), (즉, 피라미드형 격자의 주기를  $p$ 라 하고, 입사파의 파장을  $\lambda$ 라 하면  $\lambda \gg p$ 인 경우)에서 등가 유전율( $\epsilon_{ieq} = \epsilon_{ix} = \epsilon_{iy}$ )과 투자율( $\mu_{ieq} = \mu_{ix} = \mu_{iy}$ )을 다음과 같이 표현한다.

$$\epsilon_{ieq} = \epsilon_o \left[ 1 + s_i \frac{2(\epsilon_r - 1)}{1 + s_i + (1 - s_i)\epsilon_r} \right] \quad (9)$$

$$\mu_{ieq} = \mu_o \left[ 1 + s_i \frac{2(\mu_r - 1)}{1 + s_i + (1 - s_i)\mu_r} \right] \quad (10)$$

여기에서,  $\epsilon_r$ 과  $\mu_r$ 은 각각 피라미드형 전파흡수체의 상대 복소 유전율 및 투자율이고,  $s_i$ 는  $i$ 번째 층의 정규화 단면적(normalized cross section)

이므로  $s_i = (z_i)^m$ 으로 표현될 수 있다. 또한 여기에서,  $z_i$ 는 피라미드형 격자의 꼭대기로부터  $i$ 번째 층까지의 거리를 피라미드형 격자의 높이  $H$ 로 정규화한 것이며, 전파흡수체 격자의 모양은 지수 " $m$ "에 따라 변한다: 즉,  $m=2$ 인 경우는 피라미드형이며,  $m=1$ 인 경우가 췌기형이다.

### III. 전송선로 근사방법의 적용한계

#### 3-1 전송선로 근사방법의 한계

우리는 앞에서의 전송선로 근사과정에서 전파흡수체를 전송선로로 표현하므로 수직 입사하는 전자파의 반사손실만을 계산할 수 있고, 경사입사 전자파의 반사손실은 다른 근사가 추가되어야 함을 알 수 있다. 또한 주기적인 격자구조에서 균일한 전자장 분포를 가정하기 위해  $\lambda \gg p$ 인 저주파수 한계를 고려하고 있으며, 따라서 격자구조의 주기가 관심주파수의 파장에 근접할 경우 문제가 생길 수 있음을 알 수 있다. 그리고 Hashin-Shtrikman 공식은 Maxwell-Garnet의 유효매질 이론의 2차원 모델이며, 따라서 격리구조(separated grain structure)의 단위구조를 가정하는 Maxwell-Garnet 공식이 잘 만족하는 영역, 즉, 낮은 물성에서 유효 유전율을 잘 설명할 수 있다<sup>[14]</sup>. 그러나 물성상수 값의 크기가 크지면 문제가 생길 수 있음을 예상할 수 있다.

이러한 적용한계의 여러 가지 가능성을 고려하기 위해 유한요소법을 이용하여 피라미드형 전파흡수체의 반사손실을 계산하였으며, 그 결과를 전송선로 근사방법으로 계산한 결과와 비교하였다. 계산에 사용된 유한요소법은 참고문헌<sup>[15]</sup>에 보인 것과 같고, 높은 주파수에서의 유한요소 분할오차(segmentation error)를 줄이기 위해서 사용된 컴퓨터의 용량을 고려하여  $0.1\lambda_o / \sqrt{|\epsilon_r|}$ 보다 작게 분할하여 각 유한요소소의 한 변을 0.819 cm로 분할하였다. 사용된 전송선로 근사방법과 유한요소법의

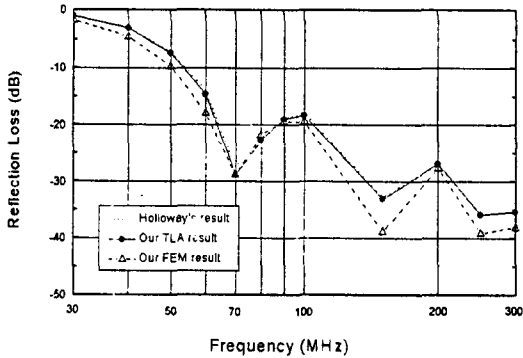


그림 2. 계산에 사용된 전송선로 근사방법과 유한요소법의 유효성 확인

Fig. 2. Validation of TLA and FEM approaches used for calculations.

유효성을 살펴보기 위해 카본의 함유율이 26%이고, 총 높이가 4ft인 상용 피라미드형 전파흡수체의 반사손실을 계산하였으며, Holloway와 Kuester의 계산결과와 비교한 결과를 그림 2에 보였다. 그림 2으로부터 사용된 두 계산방법이 유효함을 알 수 있다. 보다 자세한 내용은 참고문헌 [15]를 참조하기 바란다.

또한 전송선로 근사방법에서 다층구조로 근사된 각층에서의 물성이 급격히 증가하지 않도록 층의 개수를 500으로 분할하여 층간의 물성이 점진적으로 증가하도록 하였다. 이러한 분할을 통해서 계산에 사용된 두 방법 모두, 수렴된 계산값을 가짐을 확인하였다. 그리고, 피라미드형 전파흡수체의 크기가 커지면 컴퓨터 계산에 한계를 가지므로 그림 3과 같은 높이가 12" 인 피라미드형 전파흡수체를 대상으로 하였다. 계산에 사용된 피라미드형 전파흡수체를 편의상 12" 피라미드형 전파흡수체라고 부르지만 엄밀하게는 그림 3에서 볼 수 있는 것처럼 총 높이가 12 1/4" 이다. 본 논문에서도 편의상 12" 피라미드형 전파흡수체라고 부르겠다.

먼저 유전율의 변화에 따른 전송선로 근사방법(TLA)의 적용한계를 살펴보기 위해 12" 피라미드형 전파흡수체의 반사손실의 변화를 유한요소법

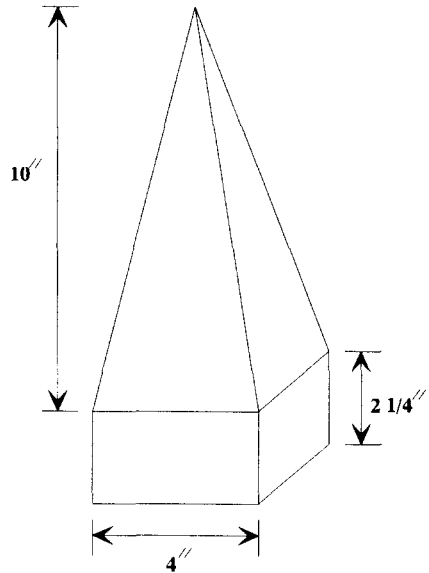
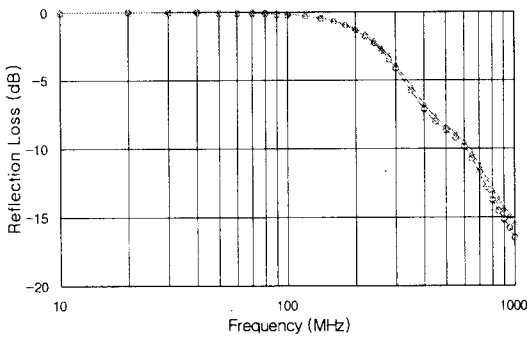


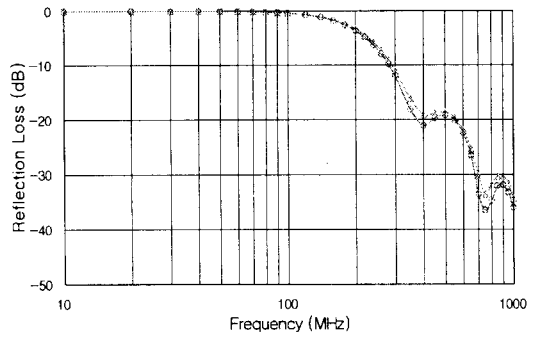
그림 3. 계산에 사용된 피라미드형 전파흡수체의 물리적 크기

Fig. 3. Physical dimensions of the pyramidal dielectric absorber used for calculations.

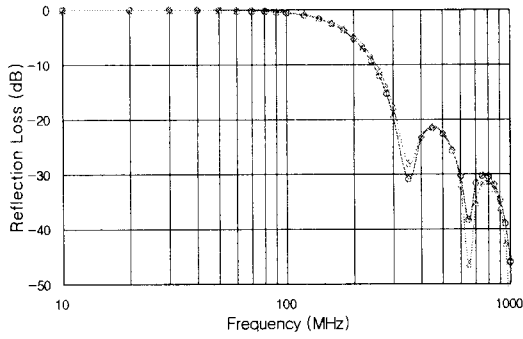
(FEM)과 전송선로 근사방법으로 계산하였다. 두 방법의 비교를 위해 계산결과를 그림 4에 보였다. 그림 4로부터 두 방법에 의한 계산결과가 다음과 같음을 알 수 있다: (a)  $\epsilon_r = 2.0 - j 1.0$ 인 경우는 10 MHz~1 GHz의 주파수대역에서 1.2 dB 이내에서 잘 일치함, (b)  $\epsilon_r = 2.0 - j 3.0$ 인 경우는 10 MHz~1 GHz의 주파수대역에서 2.9 dB 이내에서 잘 일치함, (c)  $\epsilon_r = 2.0 - j 5.0$ 인 경우는 10 MHz~600 MHz의 주파수대역에서 3.0 dB 이내에서 잘 일치함, (d)  $\epsilon_r = 2.0 - j 7.0$ 인 경우는 10 MHz~550 MHz의 주파수대역에서 3.0 dB 이내에서 잘 일치함, (e)  $\epsilon_r = 2.0 - j 9.0$ 인 경우는 300 MHz의 정합주파수에서 6.5 dB의 차이를 제외하고, 10 MHz~500 MHz의 주파수대역에서 1.9 dB 이내에서 잘 일치함, (f)  $\epsilon_r = 2.0 - j 11.0$ 인 경우는 280 MHz에서 4.27 dB, 300 MHz의 정합주파수에서 6.3 dB의 차이를 제외하고, 10 MHz~450 MHz의 주파수대역에서 2.0 dB 이내에서 잘 일치함.



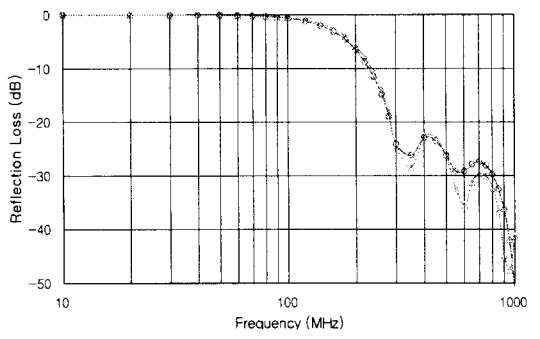
(a)



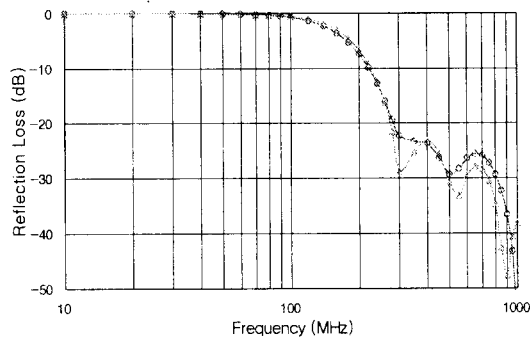
(b)



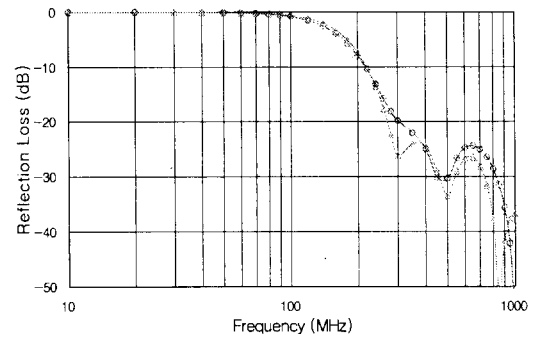
(c)



(d)



(e)



(f)

그림 4. 12" 피라미드형 전파흡수체의 유전을 변화에 따른 반사손실 계산결과 비교(○: FEM, △: TLA)  
 (a)  $\epsilon_r = 2.0 - j 1.0$ , (b)  $\epsilon_r = 2.0 - j 3.0$ , (c)  $\epsilon_r = 2.0 - j 5.0$ , (d)  $\epsilon_r = 2.0 - j 7.0$ ,  
 (e)  $\epsilon_r = 2.0 - j 9.0$ , (f)  $\epsilon_r = 2.0 - j 11.0$ .

Fig. 4. Comparison of calculation results for the reflectivity of a 12" pyramidal absorber according to variable complex permittivities.(○: FEM, △: TLA)  
 (a)  $\epsilon_r = 2.0 - j 1.0$ , (b)  $\epsilon_r = 2.0 - j 3.0$ , (c)  $\epsilon_r = 2.0 - j 5.0$ , (d)  $\epsilon_r = 2.0 - j 7.0$ ,  
 (e)  $\epsilon_r = 2.0 - j 9.0$ , (f)  $\epsilon_r = 2.0 - j 11.0$ .

그림 4의 결과로부터 유전율이 커질수록 두 계산결과가 일치하는 주파수대역이 좁아지고, 특히, 정합주파수 주위에서 큰 차이를 나타냄을 알 수 있다. 여기에서, 두 계산결과와의 차가 3.0 dB 이내인 주파수영역의 상한 주파수에서의 파장,  $\lambda = \lambda_0 / \sqrt{|\epsilon_r|}$ 는 다음과 같다: (a)  $\epsilon_r = 2.0 - j 1.0$ 인 경우, 상한 주파수는 1 GHz,  $\lambda = 20.26$  cm, (b)  $\epsilon_r = 2.0 - j 3.0$ 인 경우, 상한 주파수는 1 GHz,  $\lambda = 15.79$  cm, (c)  $\epsilon_r = 2.0 - j 5.0$ 인 경우, 상한 주파수는 600 MHz,  $\lambda = 21.54$  cm, (d)  $\epsilon_r = 2.0 - j 7.0$ 인 경우, 상한 주파수는 550 MHz,  $\lambda = 20.22$  cm, (e)  $\epsilon_r = 2.0 - j 9.0$ 인 경우, 상한 주파수는 500 MHz,  $\lambda = 19.76$  cm, (f)  $\epsilon_r = 2.0 - j 11.0$ 인 경우, 상한 주파수는 450 MHz,  $\lambda = 19.94$  cm. 한편, 피라미드형 전파흡수체의 격자(피라미드) 주기  $p$ 는 10.16 cm이다. 따라서 앞에서의 상한 주파수,  $\lambda$ 와 격자주기,  $p$ 를 비교하면 그림 5에서 볼 수 있는 것처럼  $\lambda \geq 2p = 20.32$  cm의 조건이 만족하는 영역에서 전송선로 근사방법과 유한요소법에 의한 계산결과가 잘 일치함을 알 수 있다.

그러나  $|\epsilon_r| \geq 7.28$ 인 영역에서  $\lambda \geq 2p$ 의 조건이 만족하더라도 정합주파수 주위에서 두 방법이 서로 잘 일치하지 않는 계산결과를 얻을 수 있다. 따라서 Gau<sup>[9]</sup>가 제시한 다른 조건,  $|\epsilon_r| \leq 6.0$ 을 만족하는 영역에서 두 방법이 잘 일치한다고 판단할 수도 있으나, 이러한 판단은 3-2절에 보인 실제의 피라미드형 전파흡수체의 계산결과에서  $|\epsilon_r| \leq 6.0$ 인 물성에서도 두 계산결과가 잘 일치하는 주파수대역이 있음을 알 수 있고, 따라서 적절한 조건이 아님을 알 수 있다. 전송선로 근사방법은 전파흡수체 배열을 무한한 크기의 평면형 다층구조로 근사하므로 원리적으로 전파흡수체 배열 사이에서의 전자파의 다중반사를 고려할 수 없지만, 유한요소법에서는 그러한 다중반사를 고려하고 있다. 아 물론, 정합주파수에서 두 방법에 의한 계산결과와의 편차는 두 방법이 가지는 근사에 기인하는 오차로 판단되며, 앞으로 정합주파수에서의 해

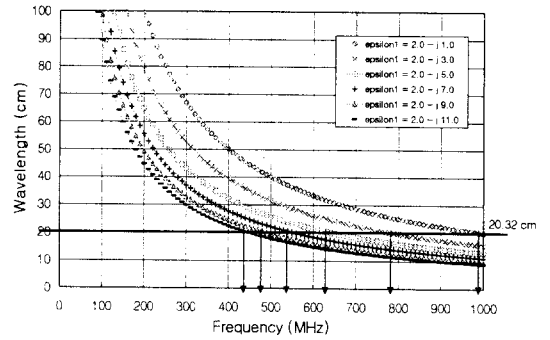


그림 5. 유전율 변화에 따른 파장과 전송선로 근사방법의 적용 한계 주파수

Fig. 5. The application frequency limits of TLA and the wavelength according to the various complex permittivities.

석오차에 대한 보다 엄밀한 분석이 필요하다.

결론적으로, 전송선로 근사방법은  $\lambda \geq 2p$ 의 조건을 만족하는 저주파산란 영역에서 피라미드형 격자구조를 다층형 복합체로 근사할 때 사용 가능하다. 따라서 이러한 조건을 만족하지 않는 영역에서는 전송선로 근사방법은 반사손실의 주파수에 따른 경향성만 이해할 수 있고, 정량적인 해석을 위해서는 반드시 주기적인 전파흡수체 구조로부터 직접 전자파산란을 해석해야 한다.

### 3-2 피라미드형 전파흡수체에서의 적용

우리는 앞에서 피라미드형 전파흡수체의 설계에 전송선로 근사방법을 적용할 수 있는 한계를 살펴 보았다. 본 절에서는 실제의 피라미드형 전파흡수체의 반사손실을 전송선로 근사방법과 유한요소법으로 계산하고, 그 결과를 앞 절에서 결론지은 적용한계를 고려하여 해석하고자 한다. 계산에 사용된 피라미드형 전파흡수체의 구조는 앞의 그림 3과 같으며, 카본의 함유율에 따른 유전율의 변화는 표 1<sup>[16]</sup>과 같다. 또한 이러한 물성에서의 파장과 전송선로 근사방법이 적용 가능한 상한 주파수는 그림 6과 같다. 그림 6으로부터 전송선로 근사방법

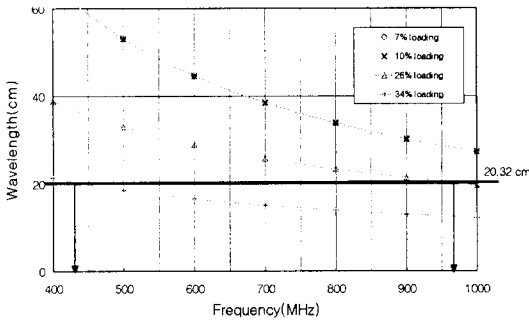


그림 6. 12" 피라미드형 전파흡수체의 카본 함유율에 따른 파장과 전송선로 근사방법의 적용 한계 주파수

Fig. 6. The application frequency limmits of TLA and the wavelength according to the various carbon fractions.

이 적용 가능한 상한 주파수는  $\lambda \geq 2b$ 의 조건을 적용하여 카본 함유율이 26%인 경우는 920 MHz, 카본함유율이 34%인 경우는 460 MHz임을 알 수 있다.

표 1과 같은 물성을 가지는 12" 피라미드형 전파흡수체의 반사손실을 유한요소법과 전송선로 근사방법으로 계산한 결과는 그림 7과 같다. 그림 7로부터 카본 함유율이 7%, 10%, 26%인 경우는 각기 30 MHz~1 GHz의 주파수대역에서 0.05 dB, 0.1 dB, 1.9 dB 이내에서 두 방법이 잘 일치하며, 카본 함유율이 34%인 경우는 30 MHz~450 MHz의 주파수대역에서 0~3.0 dB 이내에서 두 방법이 잘 일치함을 알 수 있다.

표 1. 피라미드형 폴리우레탄 전파흡수체의 카본 함유율에 따른 복소 비유전율 데이터<sup>[16]</sup>.

Table 1. Complex relative permittivity data on the pyramidal dielectric absorbers having variable carbon fractions in polyurethane substrate<sup>[16]</sup>.

| Frequency (MHz) | Polyurethane pyramid absorber |                |               |                |               |                |               |                |
|-----------------|-------------------------------|----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|
|                 | 7% loading                    |                | 10% loading   |                | 26% loading   |                | 34% loading   |                |
|                 | $\epsilon_r'$                 | $\epsilon_r''$ | $\epsilon_r'$ | $\epsilon_r''$ | $\epsilon_r'$ | $\epsilon_r''$ | $\epsilon_r'$ | $\epsilon_r''$ |
| 30              | 1.84                          | 0.78           | 1.92          | 1.26           | 13.50         | 17.86          | 37.96         | 58.19          |
| 40              | 1.72                          | 0.67           | 1.78          | 1.04           | 10.61         | 15.28          | 32.34         | 49.16          |
| 50              | 1.65                          | 0.59           | 1.69          | 0.90           | 8.80          | 13.35          | 28.21         | 43.18          |
| 60              | 1.59                          | 0.53           | 1.62          | 0.80           | 7.58          | 11.86          | 25.09         | 38.83          |
| 70              | 1.56                          | 0.49           | 1.58          | 0.72           | 6.70          | 10.67          | 22.61         | 35.42          |
| 80              | 1.52                          | 0.46           | 1.55          | 0.66           | 6.04          | 9.72           | 20.60         | 32.72          |
| 90              | 1.49                          | 0.43           | 1.51          | 0.61           | 5.53          | 8.93           | 18.93         | 30.46          |
| 100             | 1.48                          | 0.40           | 1.49          | 0.57           | 5.12          | 8.27           | 17.52         | 28.56          |
| 150             | 1.40                          | 0.32           | 1.40          | 0.44           | 3.92          | 6.07           | 12.86         | 21.97          |
| 200             | 1.37                          | 0.27           | 1.36          | 0.36           | 3.35          | 4.83           | 10.35         | 17.99          |
| 250             | 1.34                          | 0.23           | 1.33          | 0.31           | 3.00          | 4.02           | 8.74          | 15.25          |
| 300             | 1.31                          | 0.21           | 1.31          | 0.28           | 2.78          | 3.46           | 7.68          | 13.27          |
| 400             | 1.28                          | 0.18           | 1.28          | 0.23           | 2.52          | 2.72           | 6.35          | 10.55          |
| 500             | 1.26                          | 0.15           | 1.26          | 0.20           | 2.37          | 2.25           | 5.60          | 8.77           |
| 600             | 1.24                          | 0.14           | 1.24          | 0.18           | 2.26          | 1.92           | 5.09          | 7.51           |
| 700             | 1.24                          | 0.13           | 1.22          | 0.17           | 2.18          | 1.67           | 4.71          | 6.53           |
| 800             | 1.22                          | 0.12           | 1.21          | 0.16           | 2.11          | 1.47           | 4.42          | 5.73           |
| 900             | 1.21                          | 0.12           | 1.21          | 0.14           | 2.05          | 1.30           | 4.20          | 5.05           |
| 1000            | 1.20                          | 0.13           | 1.20          | 0.12           | 2.01          | 1.17           | 4.05          | 4.48           |



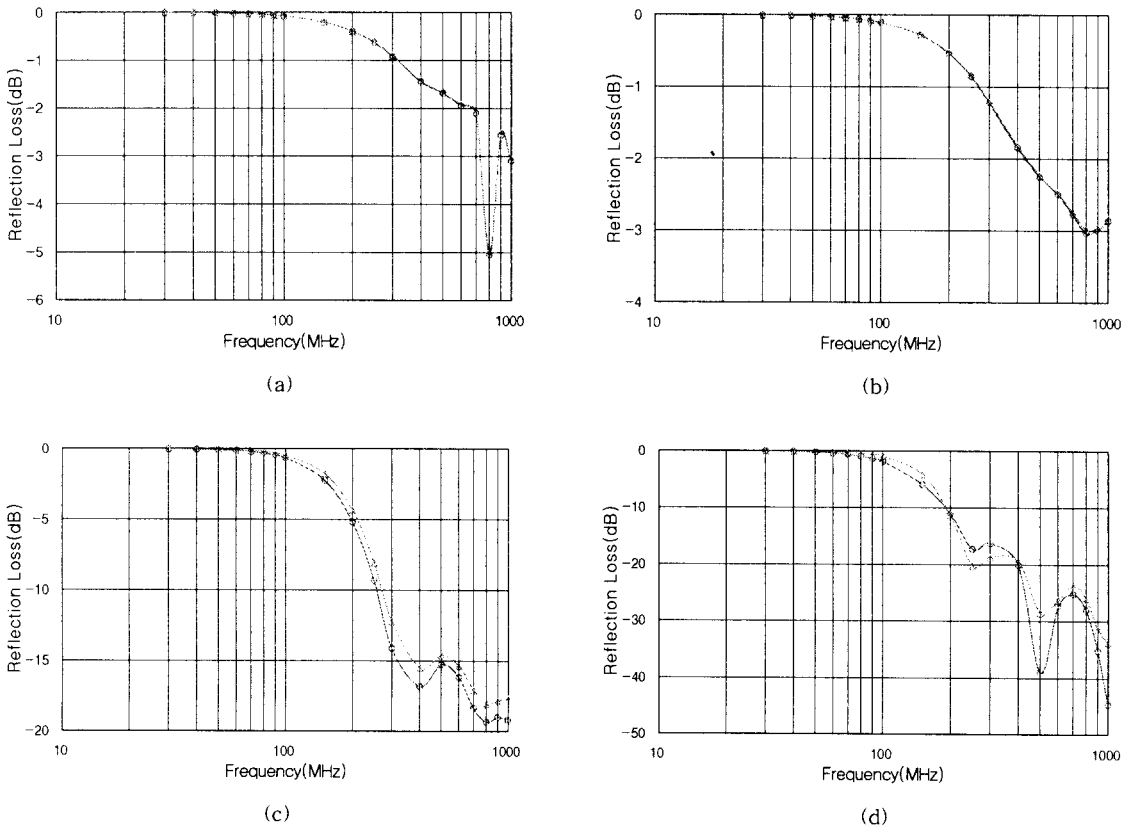


그림 7. 12" 피라미드형 전파흡수체의 카본 함유율에 따른 반사손실의 변화 (○: FEM, △: TLA)

(a) 7% loading, (b) 10% loading, (c) 26% loading, (d) 34% loading.

Fig. 7. Comparison of calculation results for the reflectivity of the real 12" pyramidal dielectric absorbers according to the permittivity variations due to the carbon fractions. (○: FEM, △: TLA)

(a) 7% loading, (b) 10% loading, (c) 26% loading, (d) 34% loading.

따라서 그림 5에서 구한 적용한계가 대체적으로 잘 성립함을 알 수 있다. 또한 여기에서, Gau가 제시한 물성에 대한 제한 조건,  $|\epsilon_r| \leq 6.0$ 을 적용하지 않아도 저주파산란 근사에 대한 조건,  $\lambda_g \geq 2p$ 만 성립하면 전송선로 근사방법을 이용하여 쉽게 전파흡수체를 설계할 수 있음을 알 수 있다. 이는 물성에 대한 제한 조건은 전파흡수체 내에서 전자장이 어느 정도 균일하게 분포되어야 한다는 가정을 고려한 것이고, 따라서, 보다 낮은 주파수에서는 보다 높은 물성을 가져도 계산하고자 하는 구조 내에서 균일한 전자장 분포를 가질 수 있다면

문제가 되지 않는다는 것을 의미한다. 즉, 이러한 물성에 대한 제한 조건은 이미 저주파산란 근사에 대한 조건 내에 포함되어 있는 것으로 생각할 수 있으며, 따라서 물성에 대한 다른 조건이 필요치 않은 것으로 판단된다.

#### IV. 결 론

전파흡수체의 특성은 반사손실로 표현된다. 전파흡수체의 반사손실은 입사 전자파의 주파수와 전파흡수체의 물성, 복소유전율과 복소투자율, 전파

흡수체의 구조에 따라 변화한다. 이러한 전파흡수체의 전자파산란 문제는 전송선로 근사방법을 적용하여 매우 간단하게 표현할 수 있다. 이러한 방법은 전자장 수치해석 방법이 엄청난 계산을 필요로 하는 것에 비해 매우 직관적이고, 간단하므로 그동안 전파흡수체 설계에 널리 사용되어져 왔다. 그러나 이러한 방법은 저주파산란을 가정하므로 근사과정에서의 한계때문에 적용범위에 한계를 가진다.

이러한 적용한계를 고찰하기 위해 피라미드형 전파흡수체의 반사손실을 전송선로 근사방법과 유한요소법을 이용하여 계산하였다. 먼저, 전파흡수체의 유한요소 분할오차를 최소화하기 위해 전파흡수체의 크기가  $12\lambda$  인 것을 선택하였으며, 주파수에 대해 일정한 유전율을 가지는 경우에 대해 유전율을 변화시켜 가면서 두 방법으로 계산된 결과를 비교하였다. 비교한 결과, 전송선로 근사방법은  $\lambda \geq 2p$  인 영역(여기에서,  $p$ 는 전파흡수체의 배열주기,  $\lambda$ 는 관심주파수 상한에서의 파장)에서 유효함을 확인하였다. 또한 카본 함유율에 따른 실제의 주파수 의존성 물성을 적용하여 전파흡수체의 반사손실을 두 방법으로 계산하였으며, 앞에서의 적용한계가 잘 성립함을 확인하였다.

결론적으로, 그동안 전파흡수체 설계에 널리 적용되어 왔던 전송선로 근사방법은  $\lambda \geq 2p$  인 영역에서 유효한 결과를 제공하며, 흔히 이러한 조건을 만족치 않는 높은 물성을 갖거나 물리적 크기가 큰 구조의 전파흡수체는 반드시 전자파산란을 직접 수치해석적으로 계산해야 한다.

### 참 고 문 헌

- [1] B. L. Michielsen, L. Leyten, R. W. C. van der Veecken, "Numerical analysis of plane-wave reflection from double periodic absorber structure," in *Proc. 1991 9th Int. Zurich Symp. on EMC*, pp. 551-556, Zurich, Mar. 12-14, 1991.
- [2] W. Sun, K. Liu, and C. A. Balanis, "Analysis of singly and doubly periodic absorbers by frequency-domain finite-difference method," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 44, no. 6, pp. 798-805, Jun. 1996.
- [3] 青柳貴洋, 西方敦博, 清水康敬, "ウェッジ形電波吸収体のMMP法とFD-TD法による反射特性の比較," *信學技報, EMCJ 96-15*, pp. 23-30, 1996.
- [4] R. Janaswamy, "Oblique Scattering from Lossy Periodic Surfaces with Application to Anechoic Chamber Absorbers," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 40, no. 2, pp. 162-169, Feb. 1992.
- [5] C. F. Yang, W. D. Burnside, and R. C. Rudduck, "A Doubly Periodic Moment Method Solution for the Analysis and Design of an Absorber Covered Wall," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 41, no. 5, pp. 600-609, May 1993.
- [6] M. J. Gans, "A general proof of Floquet's theorem," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, pp. 384-385, 1965.
- [7] E. D. Kuester and C. L. Holloway, "A Low-Frequency Model for Wedge or Pyramid Absorber Arrays - I: Theory," *IEEE Trans. Electromag. Compat.*, vol. 36, no. 4, pp. 300-306, Nov. 1994.
- [8] C. L. Holloway and E. D. Kuester, "A Low-Frequency Model for Wedge or Pyramid Absorber Arrays - II: Computed and Measured Results," *IEEE Trans. Electromag. Compat.*, vol. 36, no. 4, pp. 307-313, Nov. 1994.
- [9] J. J. Gau and W. D. Burnside, "Transmission Line Approximation for Periodic

Structures of Dielectric Bodies and Its Application to Absorber Design," in *Proc. IEEE Int. Antennas Propagat. Symp.*, pp. 2148-2150, Seattle, Jun., 1994.

- [10] 安齊弘樹, 內藤喜之, 水本哲弥, "ピラミッド形電波吸収体の斜入射特性とその等価回路近似モデルについて," *電子情報通信學會論文誌 B-II*, vol. J79-B-II, no. 10, pp. 686-693, Oct. 1996.
- [11] Yeon-Choon Chung, Dong-Young Kim, and Dong-Chul Park, "Design of Broadband Electromagnetic Absorber Using NiZn/MnZn Ferrite Hybrid Structure," in *Proc. IEEE Int. Symp. EMC*, pp. 409-412, Austin, TX, Aug. 1997.
- [12] O. M. Bucci and G. Franceschetti, "Scattering from wedge-tapered absorbers," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, pp. 96-104, Jan. 1971.
- [13] Z. Hashin and S. Shitrikman, "A variational

approach to the theory of the effective magnetic permeability of multiphase materials," *J. Appl. Phys.*, pp. 3125-3131, Oct. 1962.

- [14] AIP Conference proceedings no. 40, *Electrical Transport and Optical Properties of Inhomogeneous Media*, Ohio State University, 1977.
- [15] 정연춘, 김병욱, 박동철, "3차원 혼성 유한요소법을 이용한 전파흡수체의 전파 특성 해석," *한국전자과학회 논문지* vol. 10 no. 3 pp. 440~448, Jun. 1999.
- [16] C. L. Holloway, R. R. DeLyser, R. F. German, P. McKenna, M. Kanda, "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, no. 1, pp. 33-47, Feb. 1997.

### 정 연 춘



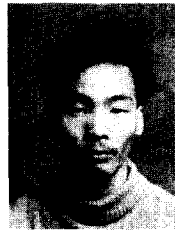
1984년 2월: 경북대학교 자연과학대학 물리학과(공학사)  
 1986년 2월: 경북대학교 대학원 물리학과(공학석사)  
 1996년 3월~현재: 충남대학교 대학원 전자공학과(박사과정)  
 1985년 12월~현재: 한국표준과학연

구원 전자기연구부 전자기환경그룹 그룹장

1993년 12월: 한국전자과학회 학술상 수상

[주 관심분야] 복합재료의 전자기물성 측정 및 해석, EMI/EMC 정밀 측정기법, 전자장 수치해석

### 김 병 욱



1994년 2월: 서강대학교 공과대학 전자공학과(공학사)  
 1996년 2월: 서강대학교 대학원 전자공학과(공학석사)  
 1997년 12월~현재: 한국표준과학연구원 전자기연구부 연구원

[주 관심분야] 유한요소법을 이용한 전자장 수치해석, 고주파 유도전류에 의한 전자과장해 현상

박 등 철



1974년 2월: 서울대학교 공과대학  
전자공학과(공학사)

1976년 2월: 한국과학기술원 전기·  
전자공학과(공학석사)

1984년 12월: University of Califor-  
nia, Santa Barbara(공학박사)

1976년~현재: 충남대학교 공과대학

전파공학과 교수

1977년~1978년: Ruhr University, Bochum, Germany,  
방문교수

1994년~1998년: IEEE MTT Korea Chapter Chairperson

1996년~현재: 한국전자과학회 부회장

1998년~현재: IEEE EMC Korea Chapter Chairperson

[주 관심분야] Microwave and millimeter-wave passive  
devices, EMC/EMI topics, and Antennas.