工學碩士 學位論文

꼭지절단 원추형 페라이트 배열 전파흡수체의 최적 설계 및 제작에 관한 연구

A Study on Design and Fabrication of Ferrite Electromagnetic Wave Absorber in Top-Cut Corn Array Type.

指導敎授　金　東　一

2001 년 2 월

韓國海洋大學校 大學院

電波工學科

朴　種　球

本 論文을 朴 種球의 工學碩士 學位論文으로 認准함.

委員長 : 工學博士 鄭 世 謨 (印)

委 員 : 工學博士 閔 庚 植 (印)

委 員 : 工學博士 金 東 一 (印)

2001 年 2 月

韓國海洋大學校 大學院

電波工學科 朴 種 球

Abstract

According to the development of the electronics and the radio communications technologies, the human life has been abundant. Due to the extended use of electromagnetic wave, however, it has become important to work out a countermeasure for EMI/EMS. Thus, the international organazations, for example, ANSI, FCC, CISPR, etc. have studied and established the regulations or the rules for EMI/EMC.

The absorbing ability of 20 dB have required for the electromagnetic wave absorbers used in an anechoic chamber for EMI/EMS measurement in the bandwidth through 30 MHz to 1,000 MHz. From November of 1998, however, the frequency band for EMI measurement from 1 GHz to 18 GHz accepted as CISPR11 in addition to the conventional one. The actually and broadly used wave absorber for an anechoic chamber was a type of tile or grid, which has the bandwidth from 30 MHz to 400 MHz or up to 870 MHz. Therefore, it is required to expand the frequency band of wave absorption.

In this thesis, for this reason, the top-cut corn array type was proposed and the broadband design was carried out using the equivalent material constants method. Moreover, the computer simulation and experiment were performed. The results are as follows :

(1) As a simulation result, the designed absorber has the wide band characteristics from 30 MHz to 50 GHz, the thickness of which is very thin just as 34.7 mm.

(2) It was confirmed experimentally that the fabricated wave absorber has the absorbing ability of 20 dB in the frequency band from 30 MHz to 1.08 GHz .

Thus, it was clearly shown that the available room can be effectively obtained in an anechoic chamber by using the designed thin absorber.

As a further work, the experiments in high frequency band above 1 GHz is made progress.

Nomenclature

$\mathbf{B}$: Magnetic Flux Density Vector

C : Capacitance

$\mathbf{D}$: Electric Flux Density Vector

d_n : Thickness of nth Layer

$\mathbf{E}$: Electric Field Vector

G : Conductance

$\mathbf{H}$: Magnetic Field Vector

I : Current

$\mathbf{J}$: Electric Conduction Current Density Vector

L : Inductance

R : Resistance

V : Voltage

V_1, I_1 : Voltage, Current in the Air Region(Input)

V_2, I_2 : Voltage, Current in Sample

Y : Admittance

Z : Impedance

$\mathbf{Z}_c$: Characteristics Impedance

z_n : Input Impedance of nth Layer

α : Attenuation Constant

β : Phase Constant

γ : Propagation Constant

ε : Permittivity

ε_0 : Permittivity of Vacuum

ε_{eq} : Equivalent Permittivity

ε_{rn} : Relative Permittivity of nth Layer

λ : Wavelength

μ : Permeability

μ_0 : Permeability of Vacuum

μ_i : Initial Permeability

μ_{eq} : Equivalent Permeability

μ_{rn} : Relative Permeability of nth Layer

σ : Conductivity

ω : Anguler velocity

목 차

제 1 장 서 론

제 2 장 전파흡수체 이론

제 3 장 등가재료정수법 및 페라이트의 특성

제 4 장 꼭지절단원추형 전파흡수체의 설계 및 제작

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경

최근의 전자통신기술의 발달은 인간의 생활을 윤택하게 해주는 반면, 전자파 발생요인의 증가와 함께 심화되고 있는 전자파장해에 대한 대책이 사회적으로 큰 관심을 끌고 있다. 이에 대한 대책으로 국제적으로는 국제무선장해특별위원회(CISRP ; Comite Internationale Special des Perturbations Radioelectrique), 미국에서는 미연방통신위원회(FCC ; Federal Communications Commissions), 미국국가표준협회(ANSI ; American National Standards Institute)등에서 규제를 만들게 되었으며, 우리나라에서도 전자통신용 장비의 전자파장해(EMI ; Electromagnetic Interference) /전자파양립성(EMC ; Electromagnetic Compatibility) 규제를 만들어 수출에 대비하고 있다[1]. 따라서 EMI/EMC 규제에 대비하여 전파무향실(전파암실)용 전파흡수체의 수요가 급격히 증가하고 있는 실정이다. 특히, EMI/EMC 규제와 관련하여 전기ㆍ전자 기기에서의 방사파를 측정하기 위한 전파무향실용 전파흡수체가 국제규격기준(ANSI C634-1991, CISPR A SEC 109, 또는 IEC 801-3)을 충분히 만족시키기 위해서는, 20 dB (99 %) 이상의 전파흡수능을 가지는 주파수 대역이 30 MHz에서 1000 MHz 정도의 성능이 요구되어 왔으나, 1998년 11월 국제무선장해특별위원회(CISPR)에서는 기존의 규격에 덧붙여 1 GHz - 18 GHz까지의 대역을 새로이 CISPR11로서 확장하였다[2].

이러한 높은 주파수의 방사파 측정은 무한히 넓은 자유공간에서 행하는 것이 이상적이나 현실적으로 외부전파의 영향을 받지 않는 자유공간을 확보하기가 곤란하며, 옥외 측정시 주변건물, 지면 및 천후 등에 의해 영향을 받으므로 전파흡수체를 이용하여 전파적으로 자유공간과 등가인 전파무향실을 구성하여 측정을 하고 있다. 이와 같은 전파무향실을 구성하기 위해서는 특성이 우수한 전파흡수체가 필요하며 현재 섬유매트, 카본함유 발포스티롤, 자성체 재료 및 이들을 조합한 다양한 전파흡수체가 개발되어 이용되고 있다[3].

현재 전파흡수체를 사용하는 전파무향실은 페라이트 소결체에 카본스티롤을 적층한 복합형 전파흡수체가 사용되고 있으며, 또한 Nisshinbo Tempest의 경우는 30

MHz에서 800 MHz 대역에서 20 dB 이상의 전파흡수체능을 가지는 Grid형 전파흡수체를 개발하여 양산하고 있다. 현재의 전파무향실용 전파흡수체는 두꺼워서 전파무향실의 유효공간이 전체 체적의 50 % 정도밖에 안되어 효율이 낮은 실정이며, 이로부터 충분한 유효공간을 확보하기 위해서는 전파흡수체의 두께를 얇게 할 필요가 있다.

본 논문에서는 원추절단의 형상을 가지는 페라이트 기둥형 전파흡수체를 제안하여 설계함으로써 30 MHz 50 GHz에 이르는 초광대역을 실현하고, 제작한 후 측정을 통하여 그 성능을 알아보고자 한다. 또한, 기존의 전파무향실의 경우 전파흡수체의 총 두께가 1.8 3 m 이상이 필요한 경우와는 달리, 총 두께 50 mm 이하를 가지게 함으로서 주파수대역폭, 공간적인 효율성, 가격경쟁력, 제작의 용이성 등 모든 면에서 비교할 때 세계에서 가장 우수한 전파흡수체가 개발될 것으로 전망된다.

1.2 연구의 목적

최근 전파흡수체의 주된 용도는 각종 전자장비로부터의 누설전자파 혹은 전자파 내성(Immunity)의 검사 및 측정을 위한 전파무향실의 구성용, TV의 Ghost대책용 등에 사용되고 있는 실정이다. 그러나 현재의 전파무향실용 전파흡수체는 새로이 개정된 국제규격기준을 만족시키기에는 사용가능 주파수 범위가 현저히 낮다. 앞으로의 전파무향실용 전파흡수체가 국제규격기준을 만족시키려면 30 MHz에서 18 GHz에 이르는 대역에서 20 dB 이상의 전파흡수능을 가져야 한다.

종래의 단일 자성체층으로 이루어지는 전파흡수체를 광대역화하는 방법으로서, 타일상의 페라이트를 전자파 반사판으로부터 공기층(실제로는 발포우레탄 판 등을 사용)을 형성하여 배치하는 방법이 제안되어 있다. 즉, 7.4 mm의 Ni-Zn계 소결페라이트 타일을 반사판 앞에 공기층을 적절히 두고 설치하면 30 MHz에서 400 MHz 정도의 주파수대역에 대하여, 반사감쇠량 20 dB 정도의 전파흡수체가 얻어진다. 또한, 단일 자성체층으로 이루어지는 광대역 전파흡수체로서, 핀형 및 격자형의 광대역 전파흡수체가 제안되어 있다. 그러나, 이러한 기존의 전파흡수체는 상기의 국제규격기준을 만족시키기에는 너무나 미흡한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 상기의 요구를 충족시키기 위하여 전파흡수체의 형상변화를 통하여 광대역화를 꾀하고자 한다. 기둥형, 십자돌기형등 기존의 연구수행을 거쳐 원추절단의 형상을 가지는 페라이트 전파흡수체를 제안하여 30 MHz에서 50 GHz에 이르는 대역에서 20 dB의 전파흡수능을 가지며, 전체 두께 4 cm 미만으로서 제작이 용이한 전파무향실용 전파흡수체를 설계하고자 한다.

제 2 장 전파흡수체의 이론

2.1 서 론

검은 천으로 주위가 가리워진 곳에서 실행되는 광학 실험은 그 특성을 조사할 때 외부의 빛의 영향을 받지 않게 하기 위함이고, 가시광선에 대해서 검은 천을 사용하는 것은 빛을 반사하지 않고 잘 흡수하기 때문이다. 이와 같이 광학실험을 행하기 위한 암실과 마찬가지로 전파에 대해서도 어떤 특별한 공간이 필요하다. 전파실험에 있어서 가장 중요시되면서도 갖추기가 용이하지 않은 것이 이러한 공간을 획득하는 것이다. 이것을 전파암실이라 하고, 이곳에서 광학실험실의 검은색 커튼과 같은 역할을 하는 것이 전파흡수체이다.

만약에 전기에너지를 포함한 건전지에 전구를 연결했다고 하면 그것은 빛을 방사하는 동안 뜨거워진다. 그것은 전기에너지가 변화하여 빛과 열에너지로 변화된 것을 보여 주는 것이다. 일반적으로 전기 에너지를 열에너지로 변화시키는 물체를 저항체라고 하는데 전구의 경우는 텅스텐을 저항체로 사용하였다. 전파흡수체도 저항체 성질을 갖게 되는 여러 가지 재료들을 알맞게 혼합하여 흡수체 내부의 임피던스를 공간의 임피던스와 정합 되도록 설계하면 공간의 전파에너지가 흡수되어 열에너지로 변하게 되는 것이다. 결과적으로 전파흡수체는 도달하는 전파에너지를 전부 또는 어느 특정한 값 이하로 반사를 제한하기 위하여 필요한 것이다. 이와 같이 반사를 제한하기 위해서는 입사되는 전파에너지를 열에너지로 변화 시켜야만 한다. 불필요한 전파를 내지 않거나 또는 반사를 하지 않도록 하는 재료로는 주로 양도체의 금속 또는 저저항체, 손실재료 등이 있다. 손실재료의 분포정수회로(전송선로)의 기본식과 평면파의 미분방정식을 비교해보면 저항과 콘덕턴스는 각각 복소투자율의 허수항과 복소유전율의 허수항에 대치되며 도전율은 복소유전율의 허수항에 추가된다. 결국 도전 손실재 σ, 자성손실재 μ'', 유전손실재 ε'' 중의 하나 또는 이들의 조합으로 전파흡수체가 형성된다. 이들의 사용방법은 아래 3가지로 분류할 수 있다.

1) 전파가 몇 번이고 손실재에 부딪혀 그때마다 전파에 손실을 부여하는 경우 : 그 대표적인 예는 전자레인지 안에 넣은 식품(손실재)이다.

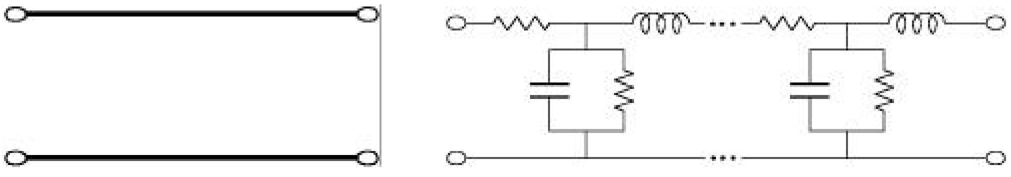
2) 전파가 1회 밖에 손실재료에 부딪히지 않는 경우 : 그 대표적인 예는 TV신호의 반사방지에 사용되는 손실재이다.

3) 어떤 정해진 통로(전송로)를 통과하는 전자파에 손실을 부여하는 경우 : 그 대표적인 예로는 동축케이블 주위에 붙인 손실재나 전자레인지용 누설방지 손실재가 있다. 이와 같이 전파 흡수체는 단일재료 또는 여러 가지 재료의 조합으로 필요한 용도에 따라 제작된다. 전파흡수체 제작에 기본이 되는 사항은 주파수, 재료정수, 두께 등을 이용하여 구하고자 하는 임피던스에 맞게 설계하여 정합을 시키는 것이다.

2.2 분포정수회로와 평면파의 미분방정식

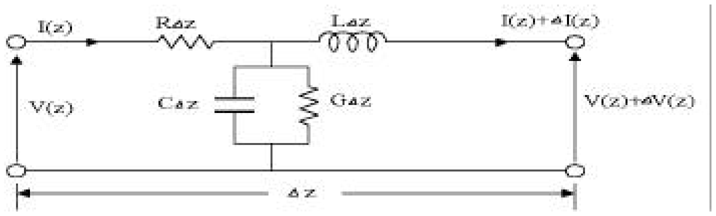
2.2.1 분포정수회로

그림 2.1(a)를 일반적인 전송선로라고 할 때 등가회로를 2.1(b)처럼 나타낼 수 있으며, 미소구간 Δz 를 택하여 2.1(c)처럼 표현하기로 하자.



(a) General Transmission

(b) Equivalent Circuit.



(c) Equivalent of Δz .

그림 2.1 일반적인 전송선로와 등가회로.

Fig. 2.1 General Transmission Line and Equivalent Circuit.

그림 2.1(c)에서 키르히호프의 법칙을 적용해서 전압과 전류 방정식을 정리하면 다음과 같다.

$$V(z) = (R\Delta z + j\omega L\Delta z)\,I(z) + V(z) + \Delta V(z) \tag{2.1}$$

$$I(z) = V(z) + \Delta V(z) + j\omega C\Delta z + G\Delta z + I(z) + \Delta I(z) \tag{2.2}$$

위 식은 다음과 같은 미분방정식으로 표현할 수 있다.

$$\frac{dV(z)}{dz} = -(R + j\omega L)\,I(z) = -Z_d I(z) \tag{2.3}$$

$$\frac{dI(z)}{dz} = -(G + j\omega C)\,V(z) = -Y_d V(z) \tag{2.4}$$

여기서 미분방정식 (2.3), (2.4)를 분포정수회로의 기본식이라고 한다. 기본식 (2.3)과 (2.4)를 Z에 대하여 미분하면

$$\frac{d^2V(z)}{dz^2} = -(R + j\omega L)\,\frac{dI}{dz} \tag{2.5}$$

$$\frac{d^2I(z)}{dz^2} = -(G + j\omega C)\,V(z)\frac{dV}{dz} \tag{2.6}$$

식(2.5)를 식(2.4)에 대입하고, 식(2.6)을 식(2.3)에 대입하면

$$\frac{d^2V(z)}{dz^2} = (R + j\omega L)\,(G + j\omega C)V \tag{2.7}$$

$$\frac{d^2I(z)}{dz^2} = (R + j\omega L)\,(G + j\omega C)\,I \tag{2.8}$$

이 된다. 여기서 $\gamma^2 = (R + j\omega L)(G + j\omega C)$이라 놓고 정리하면

$$\frac{d^2V}{dz^2} - \gamma^2 V = 0 \tag{2.9}$$

$$\frac{d^2I}{dz^2} - \gamma^2 I = 0 \tag{2.10}$$

와 같이 정리된다. 식(2.9)와 식(2.10)은 2차 미분방정식이며 그 해는 다음식으로 표현된다.

$$V = V_1 e^{-\gamma z} + V_2 e^{\gamma z} \tag{2.11}$$

$$I = I_1 e^{-\gamma z} + I_2 e^{\gamma z} \tag{2.12}$$

여기서 식(2.11)을 식(2.3)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$I = \frac{1}{Z_C}(V_1 e^{-\gamma z} + V_2 e^{\gamma z}) \tag{2.13}$$

단, $Z_C = \sqrt{(R + j\omega L)/(G + j\omega C)}$: 전송선로의 특성임피던스

V_1, I_1 : 입력 전압, 전류

V_2, I_2 : 반사 전압, 전류

$\gamma = \alpha + j\beta$: 전파정수

2.2.2 평면파의 미분방정식

전원이 없는 3차원 공간에서 Maxwell방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B}/\partial t \tag{2.14}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \partial \mathbf{D}/\partial t \tag{2.15}$$

여기서 시간 t에 대해서 $e^{j\omega t}$로 변화하는 경우를 고려하면 **E, B, D, H, J**는 시간에 관계없는 공간의 좌표 (x,y,z)의 함수로 놓을 수 있다. 이 경우 식(2.14)와 (2.15)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega \mathbf{B} \tag{2.16}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + j\omega \mathbf{D} \tag{2.17}$$

선형매질에 대한 관계 때문에 $\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}$, $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$, $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$ 이 성립하며 이때 ε, μ, σ는 각각 매질의 유전율, 투자율, 도전율이라 한다. 이 관계를 이용하면 식(2.16)과 식(2.17)은 다음 식으로 표현된다.

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega\mu \mathbf{H} \tag{2.18}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = (\sigma + j\omega\varepsilon)\mathbf{E} \tag{2.19}$$

여기서, $\nabla \times \mathbf{H} = j\omega[\varepsilon - j(\sigma/\omega)]\mathbf{E}$ 로 정리하고 $\varepsilon - j(\sigma/\omega)$를 새로운 ε으로 치환하면 식(2.19)는

$$\nabla \times \mathbf{H} = j\omega\varepsilon\mathbf{E} \tag{2.20}$$

로 다시 쓸 수 있다. $\boldsymbol{E}$, $\boldsymbol{H}$ 는 3차원 Vector이기 때문에

$$\mathbf{E} = \hat{\mathbf{x}}E_x + \hat{\mathbf{y}}E_y + \hat{\mathbf{z}}E_z \tag{2.21}$$

$$\mathbf{H} = \hat{\mathbf{x}}H_x + \hat{\mathbf{y}}H_y + \hat{\mathbf{z}}H_z \tag{2.22}$$

와 같이 x, y, z 좌표계의 관계로 쓸 수 있으며, 평면파는

$$\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} = \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial y} = \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial x} = \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial y} = 0 \tag{2.23}$$

으로 표현된다.

그러므로 회전(curl)이라는 미분연산자를 사용하여 식(2.23)의 조건하에서 식(2.18)와 식(2.20)을 다시 쓰면

$$\frac{dE_y}{dz} = j\omega\mu H_x$$

$$\frac{dE_x}{dz} = -j\omega\mu H_y$$

$$E_z = 0 \tag{2.24}$$

$$\frac{dH_y}{dz} = -j\omega\varepsilon E_x$$

$$\frac{dH_x}{dz} = j\omega\varepsilon E_y$$

$$H_z = 0 \tag{2.25}$$

와 같이 얻을 수 있으며, 이로부터 다음과 같은 미분 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{dE_x}{dz} = -j\omega\mu H_y$$

$$\frac{dH_y}{dz} = -j\omega\varepsilon E_x \qquad (2.26)$$

$$\frac{dE_y}{dz} = j\omega\mu H_x$$

$$\frac{dH_x}{dz} = j\omega\varepsilon E_y \qquad (2.27)$$

이 방정식의 해를 구함으로써 공간에서의 평면파를 이해할 수 있다[4].

2.2.3. 전파흡수체의 재료

2.2.1절의 분포 정수회로의 기본식과 2.2.2절의 평면파의 미분방정식을 다시 써보면

$$\frac{dE_x}{dz} = -j\omega\mu H_y \qquad (2.28)$$

$$\frac{dV(z)}{dz} = -(R + j\omega L)I(z)$$

$$\frac{dI(z)}{dz} = -(G + j\omega C)V(z) \qquad (2.29)$$

식(2.28)과 식(2.29)으로 각각 쓸 수 있으며, 여기서 편의상 투자율과 유전율을 다음과 같이 놓자.

$$\mu = \mu' - j\mu''$$

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''$$

식(2.28)과 식(2.29)로부터 다음과 같은 대응관계를 얻을 수 있다.

1) Inductance L - μ'

2) Capactance C - ε'

3) Resistance R - $\omega\mu''$

4) Conductance G - $\omega\varepsilon''$

이러한 관계에서 볼 때, 전기회로 내에서 전력을 소비하는 역할을 하는 것은 저항 R과 콘덕턴스 G이며 전파에너지를 소비하는 역할을 하는 것은 유전율 ε $(= \varepsilon' - j\ \varepsilon'')$과 투자율 $\mu(= \mu' - j\ \mu'')$이다. 여기서 R과 G에 대응하는 것은 각각의 복소성분 μ''과 ε''이다. 즉, 1)과 2)는 무손실이며 3)과 4)는 유손실이고 여기서 도전율 σ를 고려하면 $\varepsilon'' = \varepsilon'' + (\sigma / \varepsilon)$로 대치할 수 있다. 따라서 전파흡수체는 이러한 재료정수 $\sigma, \varepsilon'', \mu''$ 를 갖는 재료로 만들어진다. 이러한 재료들의 특성을 설명하면 다음과 같다.

가) 도전손실재(σ) : 도전율 σ에 의한 손실은 도전손실 또는 Ohm 손실이라고 불리우며, 물질중에 있는 자유전하가 전계와 동상으로 운동함으로써 생기는 것으로에 대응한다. 이러한 도전손실재로 전파흡수체에 널리 사용되고 있는 것은 카본(Carbon)이다. 전파흡수체는 보통 카본분말과 그것을 공간적으로 지지하기 위한 재료로 이루어 지는데 지지재로는 종이나 테플론 수지, 고무나 수지, 도료상의 수지 등이 사용된다. 또한 화이버 상으로 된 탄소섬유를 사용하거나, 재료를 가열하여 산화된 상태로 사용하기도 한다.

나) 자성손실재(μ'') : 자성손실재 μ''는 자성을 갖게하는 spin운동이 외부로부터 자계변화에 뒤늦게 추종함으로써 생기는 것이다. 모든 자성재료는 자성손실 μ''를 갖고 있다. 저성재료에는 금속자성재료(철,니켈 등)와 산화물 자성재(페라이트)가 있는데 전파흡수체에는 금속자성재료는 사용하지 않는다. 대개는 산화물 자성재료의 소결체나 그것을 분말로 만들어 지지재와 혼합한 것을 사용한다.

다) 유전손실재(ε'') : 유전손실 ε''은 유전성을 가져오게 하는 Dipole의 사간적변화가 외부로부터의 전계변화에 뒤늦게 추종함으로써 생기는 것으로 자유전자가 아니라 원자속에 묶여 있는 속박전자에 의한 것이다. 모든 유전재료는 유전손실을 갖지만 전파흡수체가 사용되는 주파수대에서는 그 값이 반드시 크지는 않다. 마이크로파대 (4GHz)에서 ε''의 값이 큰 대표적인 재료는 직류시에 유전율이 큰 티탄산 바륨($BaTiO_3$)인데 ε''에 의한 전파흡수체는 μ''에 비해 그 특성이 우수하지 않기 때문에 실용적인 재료로서는 의미가 없다.

라) 2종 이상의 손실을 포함하는 재료 : 손실에는 앞에서 언급한 바와 같이 σ와 ε'', μ''가 있으므로 이들을 조합하여 σ와 μ'', μ''와 ε'' 또는 σ, ε'', μ''를 포함한 재료를 생각할 수 있다. 이러한 것들은 소결체일 때는 곤란하나 각각의 재료를 분말로 하여 지지재에 혼합하면 가능하다[5].

2.3 전파흡수체의 구조 및 특성

2.3.1 전파 흡수체의 분류

1) 재료에 의한 분류

가) 도전성 전파흡수재료

저항이나 저항피막에 흐르는 고주파 전류에 의해서 전파에너지가 열에너지로 변환하는 재료로 저항률 σ가 관계한다. 대부분의 경우 전계가 큰 장소일수록 전파흡수의 정도가 크다. 또 자성손실은 없으므로 $\dot{\mu}_r = 1$이다. 이 도전성 전파흡수체인 저항 피막을 사용한 전파흡수체로는 λ/4형 전파흡수체를 들 수 있다.

나) 유전성 전파흡수재료

카본 고무, 카본 함유 발포우레탄, 카본 발포스티롤재 등이고, 재료의 저항율이나 도전율에 관계하고 복소비유전율 ε_r의 허수부 ε_r''(주파수 특성이 크다)에 의한 전파흡수재료이다. 전계가 큰 장소일 수록 전파흡수가 큰 것은 도전성 전파흡수재료와 같고 $\dot{\mu}_r = 1$이다. 특히, 발포스티롤재에 카본을 함유한 전파흡수재료는 함유하

는 카본의 양을 적당히 조절함으로써 임의의 비유전율을 얻을 수 있음으로 다층형의 전파흡수체에 적용되고 있다.

다) 자성 전파 흡수 재료

소결페라이트가 대표적인 것으로, 고무 등에 페라이트를 혼합한 고무 페라이트등이 자성 전파흡수재료이다. 복소비유전율 $\dot{\mu}_r$ 의 허수부 $\dot{\mu}_r''$ 가 전파흡수에 기여한다. 상기 가), 나)의 재료와 달리 자계가 큰 장소에서 전파흡수가 크다. 그러나 전파흡수기구가 상기와는 다르므로 VHF대에서는 대단히 얇은 전파흡수체가 실현될 수 있는 것이 특징이다.

2) 층수에 의한 분류

전파흡수체를 구성하는 경우 sheet상 또는 판상을 한층 또는 다층으로 중첩시키므로, 전파흡수체를 층수에 의해 분류해 보면 다음과 같다.

가) 단층형 전파흡수체

전파흡수재료가 한장의 층으로 되어 있고, 보통 이면에는 알루미늄이나 철판등의 금속이 붙어 있다. 저항피막에 의한 λ/4형 전파흡수체나, 유전성 전파흡수재료에 의한 단층형 전파흡수체는 일반적으로 주파수 대역폭이 좁은협대역형 전파흡수특성을 나타낸다. 단 자성전파흡수체인 페라이트 타일은 비교적 넓은 주파수특성을 나타내는 것이 특징이다.

나) 2층형 전파흡수체

단층형 전파흡수체를 광대역화 하기 위해 만든 것으로 층수가 두 장인 것이다. 사용주파수 범위를 넓히기 위해 이면에 금속을 붙인 층에서 전파를 흡수하고 전면의 층에서 공기의 전파특성 임피던스로 정합되도록 설계한다.

다) 다층형 전파흡수체

전파흡수체를 구성하는데 층의 수가 많은 것은 다층형 전파흡수체라 한다. 단, 층의 수를 그대로 불러서 3층형 전파흡수체, 4층형 전파흡수체라 부르는 경우가 있다. 일반적으로 전파흡수체는 다층형으로 구성함으로써 주파수 대역폭이 넓어진다. 따라서, 광대역 특성이 요구되는 전파무향실용으로 다층형 전파흡수체를 이용한다.

3) 외관에 의한 분류

전파 흡수체를 외관에 의해 분류하면 다음과 같다.

가) 평판형 전파흡수체

전파가 입사하는 면이 평면인 것이 평판형 전파흡수체이다 보통 단층형 전파흡수체는 평판형이고, 또 다층형 전파흡수체도 설계를 고려할 때는 평판형을 기본으로 한다.

나) 산형 전파흡수체

흡수체의 형상에 있어 최전면이 전파 흡수재료에 의한 산형의 삼각형을 한 형상을 갖는 전파흡수체를 산형 전파흡수체라 한다. 이것은 최전면을 산형으로 함에 따라서 그 부분의 전파 감쇄정수가 전파 진행 방향에 대해서 직선적으로 서서히 크게 되므로 광대역 특성이 얻어지는 특징이 있다.

다) 피라밋형 전파흡수체

미국에서 수입되고 있는 전파흡수체의 형상은 거의 피라밋형이다. 이러한 피라밋 형상을 갖는 전파흡수체는 입사한 전파를 여러 방향으로 산란시키기 때문에 반사전파가 어느 방향으로 반사되는가를 알기가 어려운 점이 있다.

4) 주파수 특성에 의한 분류

전파흡수능은 허용 반사계수가 미리 설정된 값인 S 이하로 측정되는 특성을 갖는 것을 말하므로, 그 허용치 이하로 되는 주파수 비대역폭 $\Delta f / f_0$로부터 협대역형, 광대역형, 초광대역형으로 분류된다.

가) 협대역형 전파흡수체

주파수 비대역폭 $\Delta f / f_o$가 약 10%정도 이하, 또는 경우에 따라서 20%이하의 전파흡수를 협대역형 전파흡수체라 한다. 레이다 주파수용 등 사용주파수 대역폭이 좁은 경우에 이용된다. 이 협대역형 전파흡수체의 주파수 특성은 단봉특성을 나타내고, 주로 단층형 전파흡수체로 충분하다.

나) 광대역형 전파흡수체

사용주파수가 넓은 전파흡수체를 광대역형 전파흡수체라 한다. 협대역형과 구별은 명확하지 않으나 비대역폭($\Delta f / f_o$)이 20%이상 또는 30%이상의 것이다. 이 광대역형 전파흡수체를 얻기 위해 2층형 구조로 하기도 한다. 또 소결페라이트 타일 등의 단층형 전파흡수체도 이 광대역형이다.

다) 초광대역형 전파흡수체

어느 하한 주파수 f_L이상의 주파수 전역에서 허용 반사계수 이하가 되는 특성을 갖는 전파흡수체를 초광대역형 전파흡수체라 부른다. 따라서, 주파수비대역폭은 무한대가 되어 정의할 수 없다. 층의 수가 적은 전파흡수체에서는 이러한 특성이 얻어지지 않고, 보통 다층형 전파흡수체에 의해서 실현된다[6].

2.3.2 단층형 전파흡수체

두께 d의 전파흡수체를 판상으로 하여 금속판 위에 놓은 경우, 평면파의 수직 입사에 대한 파동임피던스 Z는 진공중의 평면파 파동임피던스로 규격화하여 식(2.30)과 같이 주어진다.

$$\hat{z} = \sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}} \tanh \left(j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\varepsilon_r \mu_r}\, d \right) \qquad (2.30)$$

여기서, λ는 입사한 평면파의 진공중의 파장이며, ε_r은 비유전율($\varepsilon / \varepsilon_0$), μ_r은 비투자율(μ / μ_0)이다. 또 반사계수 $S = \frac{\hat{z} - 1}{\hat{z} + 1}$이므로, 완전한 전파흡수체로 되

기 위한 조건은 $s = 0$ 으로부터 $\hat{z}$ 가 1이 되는 것이다. 즉, 전파흡수체의 완전정합 조건식은 식(2.31)와 같다.

$$\sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}}\tanh\left(j\frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{\varepsilon_r\mu_r}\,d\right) = 1 \tag{2.31}$$

1) 비자성 재료(유전체재료)의 경우

비자성 재료란 자석에 붙지 않는 것으로서, $\mu = \mu_0$ (진공상태)이거나 $\mu_r = 1$ 인 재료를 말한다. 예를 들면 나무, 종이, 고무,플라스틱, 탄소, 우레탄 등이 여기에 포함된다. 따라서, 식(2.31)의 비투자율 μ_r 을 1로 두면 식(2.32)과 같이 된다.

$$1 = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r}}\tanh\left(j\frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{\varepsilon_r}\,d\right) \tag{2.32}$$

여기서 $\varepsilon_r = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r''$라 두고, 변수 ε_r', ε_r'', d/λ 로 하여 식의 해를 구한다. 재료를 어떻게 만드는 가에 있다. 하지만 현재의 재료과학은 $\varepsilon_r = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r''$ 에서 ε_r', ε_r''을 자유로 조절하며 설계하는 데까지 진보되어 있지 않다.

2) 자성 재료의 경우

$$\sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}}\tanh\left(j\frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{\varepsilon_r\mu_r}\,d\right) = 1 \tag{2.34}$$

비자성 재료에서는 $\mu_r = 1$로 했지만, 자성 재료의 경우는 μ_r도 여러 가지 값을 가지므로 변수가 많다. 즉 $\varepsilon_r(=\varepsilon_r' - j\varepsilon_r'')$, $\mu_r(=\mu_r' - j\mu_r'')$ 및 d/λ의 5개 변수가 있다. 식(2.34)를 고쳐 쓰면

$$-j\omega\tanh\omega = \varepsilon_r\frac{2\pi}{\lambda}d$$

$$\omega = j\frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{\varepsilon_r\mu_r}\,d \tag{2.35}$$

식(2.35)의 관계를 만족하는 재료(μ_r , ε_r , d)가 있으면 전파흡수체는 가능하나 목표는 $d \ll \lambda$ 의 조건하에서 식(2.35)을 만족시켜야 하는 것이다. $d \ll \lambda$ 의 경우 식(2.35)에서 ω 의 절대치 $|\omega|$ 는 $|\varepsilon_r \mu_r|$ 로 큰 경우와 적은 경우가 고려된다.

(1) 근사해

$\omega \ll 1$인 경우, $\tanh \omega \fallingdotseq \omega$ 로 놓을 수 있으며, 식(2.34)을 다음과 같이 변형할 수 있다.

$$1 = \sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}} \left(j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\varepsilon_r \mu_r}\, d \right) = j \frac{2\pi}{\lambda} \mu_r d \qquad (2.36)$$

여기서, $\mu_r = \mu_r' - j\mu_r''$라 놓으면,

$$1 = \frac{2\pi}{\lambda} \mu_r'' d + j \frac{2\pi}{\lambda} \mu_r' d \qquad (2.37)$$

식(2.37)로부터 $\mu_r' = 0$, $\mu_r'' \gg 1$인 재료에서 파장 λ의 전파를 흡수하기 위해 필요한 두께 d는

$$d = \frac{\lambda}{2\pi\mu_r} \qquad (2.38)$$

페라이트재의 μ_r 의 주파수 특성은 공명주파수 f_r 보다 높은 주파수대에서는 상기 정합 조건을 근사적으로 만족할 수 있다.

이 경우 두께 d에 재료의 유전율 ε_r이 관계하지 않는 것은 $d \ll \lambda$ 이며, 재료는 금속판에 부착되어 있으므로 재료의 내부에서 자계는 크지만 전계는 매우 약하기 때문이다. 따라서 전계에 동작하는 ε_r효과는 나타나지 않는 것이다.

(2) 엄밀해

$\omega \ll 1$이 만족되지 않는 경우 $d \ll \lambda$ 라도 $\sqrt{\varepsilon_r \mu_r}$이 큰 경우에는 반드시 $\omega \ll 1$이 만족되지는 않는다. 자성손실재료, 즉 μ_r''의 재료를 사용하는 경우에는 유전율 $\varepsilon_r (= \varepsilon_r' - j\varepsilon_r'')$을 $\varepsilon_r'' = 0$로 해도 좋다. 즉 유전율에는 손실항이 없고 투자율

쪽에만 손실항이 있다. $f\lambda = C$ (C는 진공중의 광속), $\mu_r = \mu_r' - j\mu_r''$이라 하면 식(2.34)는 다음과 같다.

$$1 = \sqrt{\frac{\mu_r' - j\mu_r''}{\varepsilon_r'}}\ \tanh\left(j\,\frac{2\pi}{C}\sqrt{\varepsilon_r'(\mu_r' - j\mu_r'')}\,f\,d\right) \tag{2.39}$$

이 식은 ε_r''및 f_d를 매개 변수로 하여 주어진 ε_r''에 대한 f_d를 지정하고 그 때에 필요로 하는 μ_r을 구한다.

이러한 조작으로 주어진 재료가 어떤 주파수에서 어느 두께일 때에 전파흡수체로 되는가가 구해진다. 페라이트의 μ_r은 공명주파수 f_r보다 높은 주파수 범위에서는 변화의 양이 크므로, 주파수에 의한 ε_r''의 변화가 거의 없는 통상의 유전체와 같이 d/λ를 결정해서 하나의 변수로 취급할 수 가 없다. 또, 페라이트 흡수체는 특정 두께(정합두께 d_m)에서 특정주파수 (정합주파수 f_m)의 전파만이 무반사 조건을 만족한다. 이에 비해 통상의 손실을 가지는 유전체의 경우에는, 무반사 조건으로 해서 재료의 두께 d와 전파의 파장 λ의 비만이 결정되는 것이다. 따라서 각종 파장의 전파에 대해서 재료의 두께d를 변환시키면 무반사 조건을 만족시킬 수 있다. 하지만 페라이트와 같이 μ_r이 주파수에 따라 크게 변화하는 경우에는 정합주파수가 모두 각각 유일하게 정해진다[7].

3) 타일형 전파흡수체

종래 소결페라이트 자성체를 이용한 전파흡수체가 5 8 mm 정도의 얇은 두께로 30 MHz의 저주파수의 전자파를 흡수하는 데에 뛰어난 특성을 가지고 있다고 밝혀진 이래 소결페라이트 자성체를 이용한 전파흡수체는 전자기기로부터의 방사전자파 측정을 위한 전파암실이나 건물에 의한 전파의 불요반사파를 방지하기 위한 벽제로 널리 이용되어 왔다. 그림 2.2는 가장 기본적인 페라이트 전파흡수체의 구조로서, 금속도체판 위에 타일형의 페라이트 자성체를 도포한 구조로 되어 있다.

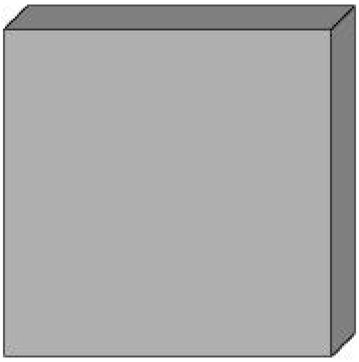


그림 2.2 타일형 전파흡수체

Fig. 2.2 Tile Type Electromagnetic Wave Absorber.

일반적으로 전파흡수체의 표면에서 전파의 반사계수를 S라고 하면, 전파흡수체의 전력흡수계수 α^2은 식(2.40)과 같이 표현된다.

$$\alpha^2 = 1 - |s|^2 \tag{2.40}$$

따라서, $|S|$가 작을수록 특성이 좋은 전파흡수체라고 할 수 있는데, 일반적으로 전파흡수체 특성 평가의 척도로 반사감쇠량($-20 \log S$) 20dB이하, 흡수계수 ≥ 0.99를 채용하고 있다. 기존의 NiZn계나 MnZn계의 소결페라이트를 이용한 타일형 전파흡수체의 경우 이 주파수대역폭이 30 MHz 400 MHz 정도로 좁기 때문에 전파암실용이나 TV 허상 대책용으로 충분하지 못하다.

4) 그리드형 전파흡수체

타일형 전파흡수체의 특성을 개선하기 위하여 페라이트를 격자모양으로 금속도체판 위에 배열한 구조로서 20 dB의 전파흡수능을 가지는 주파수대역폭이 30 MHz 870 MHz 정도로 광대역화 되었다. 그러나 방사전자파를 측정하기 위한 전파암실용 벽제로 이용하기 위해서는 상한 주파수가 18 GHz이상인 것이 요구되고 있으므로 그리드형 전파흡수체 역시 특성이 충분하지 못하다. 그림 2.3은 그리드형 전파흡수체의 외형이다.

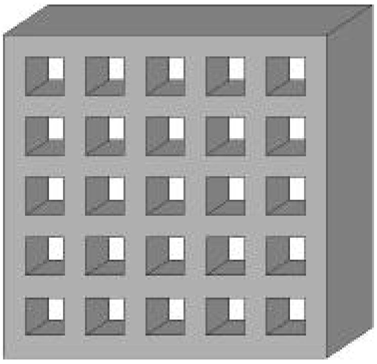


그림 2.3 격자형 전파흡수체

Fig. 2.3 Grid Type Electromagnetic Wave Absorber.

2.3.3 다층형 전파흡수체

페라이트 전파흡수체를 광대역화하기 위하여 페라이트 층 사이에 공기층을 삽입하거나 재료정수가 다른 페라이트 전파흡수체를 2개 이상의 층으로 조합한 모양, 또는 재료정수는 동일한 물질이나 전파흡수체의 형상을 공간적으로 변화시킴으로써 재료정수를 조작하여 페라이트 전파흡수체를 광대역화하고자 하는 시도가 이루어지고 있다.

1) 유전체 재료를 사용한 다층형 전파흡수체

그림 2.5는 전파흡수체의 매질 정수를 전파의 진행방향에 따라 서서히 변화시켜서 임피던스 정합을 꾀하는 것이다. 이 경우 금속판으로부터 거리 x 인 점에서의 규격화 입력임피던스 z_x 는 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$z_x = j\tan\beta l \tag{2.41}$$

여기서, β : 입사파의 위상정수

이라 하고 투자율에 대해서는 자유공간중의 μ_0 가 매체중에서도 변화하지 않는 것으로 한다. 또 전파흡수체 표면에서의 규격화 입력임피던스를 z 라 하면, 이점에 있어서의 반사계수 S는 식(2.42)와 같다.

$$S = \frac{\hat{z} - 1}{\hat{z} + 1} \tag{2.42}$$

따라서, 흡수체가 무반사로 되기 위한 조건은 $z = 1$이다. 그러나, 이것을 완전히 실현하는 것은 어려우므로 허용 반사계수를 S_0라 했을 때, 실용 정합조건은 다음 식(2.43)과 같은 식이 된다.

$$\frac{\hat{z} - 1}{\hat{z} + 1} \leqq | S_0 | \tag{2.43}$$

따라서 식(2.43)을 조건으로 하여 식(2.41)을 풀어서 z_x를 구하면 된다. 그러나, 식(2.41)은 Riccati의 비선형 미분방정식으로 범함수이므로 해석적 항법으로 해를 구하는 것은 어렵다. 그래서 금속판 표면으로부터 거리 x에 대한 임피던스의 분포를 각각 가정하고, 그때의 반사계수의 주파수 특성을 계산하여 최적인 임피던스 분포를 찾는 방법이 사용되고 있다. 여기서 $|S_0| < 0.1$인 경우, 필요한 두께의 최소치는 $1/\lambda = 0.35$정도이며 이때 ε_{rx}의 값은 식(2.44)와 같이 된다.

$$\varepsilon_{rx} = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r'' = 1 - j\left[\frac{3.9(1 - x)}{1} - 0.9\right] \tag{2.44}$$

그러나, 실제 이와 같은 ε_{rx}의 분포를 실현하는 것은 어려우므로 부분적으로 흡수체의 재료정수가 다른 것을 중첩한 다단형 구조로 설계하고 있다. 이 경우 자유공간 특성임피던스에 대해서 단계적으로 임피던스 정합을 행하므로 그 특성은 각 층의 두께와 재료정수에 의해서 결정된다.

2) 자성재료를 이용한 광대역 전파흡수체

30 MHz 1,000 MHz 정도의 주파수 범위에서 사용할 전파흡수체를 유전성 손실재료로 구성하려고 하면 흡수체의 두께가 매우 두꺼워지게 되어 실용적이 못된다. 즉, 이러한 전파흡수체는 허용 정재파비를 1.1로 할 때 사용최저주파수의 파장 λ에 대해서, 흡수체의 두께는 $0.6\lambda_d$로 되므로 100 MHz정도의 주파수대에서 사용할 전파흡수체의 두께는 1.8 m나 된다. 그러나 자성재료인 페라이트를 이용하면 30 MHz 1,000 MHz정도의 비교적 낮은 주파수대에서도 박층으로 광대역 특성을 만족시킬 수 있다. 이것은 페라이트의 투자율이 주파수 의존성이 크다는 점을 이용

한 것으로, 두께 8 mm정도에서 100 % 전후의 비대역폭이 얻어 진다. 통상 페라이트 전파흡수체를 광대역화 하기 위해서는 여러 장의 페라이트 판을 간격을 두고 배치하는 다층 분리형이 유효하다.

2.3.4 광대역형 전파흡수체

1) **광대역화 전파흡수체의 기본식**

그림 2.6과 같이 흡수체의 뒤에 금속판을 부착하고, 그 전면에 n개 층의 전파흡수체를 적층한 경우, 제N층의 두께를 d_n, **비투자율을** μ_{rn}, **비유전율을** ε_{rn} **으로 했을 때 평면파가 흡수체 전면에서 수직으로 입사하면, 제 N층의 전면에서 우측을 보는 규격화 입력임피던스** Z_n **은 식(2.45)와 같이 된다.**

$$Z_n = Z_{cn}\frac{Z_{n-1} + Z_{cn}\tanh(\gamma_n d_n)}{Z_{cn} + Z_{n-1} + \tanh(\gamma_n d_n)} \tag{2.45}$$

$(n=1,\ 2,\ 3, \cdot\cdot\cdot\cdot\cdot\cdot\cdot ,n)$

여기서 Z_{cn} **은 제N층의 특성임피던스,** γ_n **은 전파정수로서 각각 다음과 같다.**

$$Z_{cn} = \sqrt{\mu_{rn}/\varepsilon_{rn}} \tag{2.46}$$

$$\gamma_n = j\omega\sqrt{\mu_{rn}\varepsilon_{rn}} \tag{2.47}$$

따라서 식(2.46)와 식(2.47)에 대입하여 정리하면 다음 식(2.48)과 같다.

$$Z_n = \sqrt{\frac{\mu_{rn}}{\varepsilon_{rn}}}\frac{Z_{n-1} + \sqrt{\frac{\mu_{rn}}{\varepsilon_{rn}}}\tanh\left(j\frac{2\pi}{\sqrt{\mu_{rn}}}\varepsilon_{rn}d_n\right)}{\sqrt{\frac{\mu_{rn}}{\varepsilon_{rn}}} + Z_{n-1}\tanh\left(j\frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{\mu_{rn}\varepsilon_{rn}}d_n\right)} \tag{2.48}$$

이 경우 $n = 1$**일 때,** Z_{n-1}**은 금속판의 임피던스를 의미하므로 0이다. 또 이 흡수체 전면에서의 반사계수는**

$$S_n = \frac{Z_n - 1}{Z_n + 1} \tag{2.49}$$

와 같이 된다.

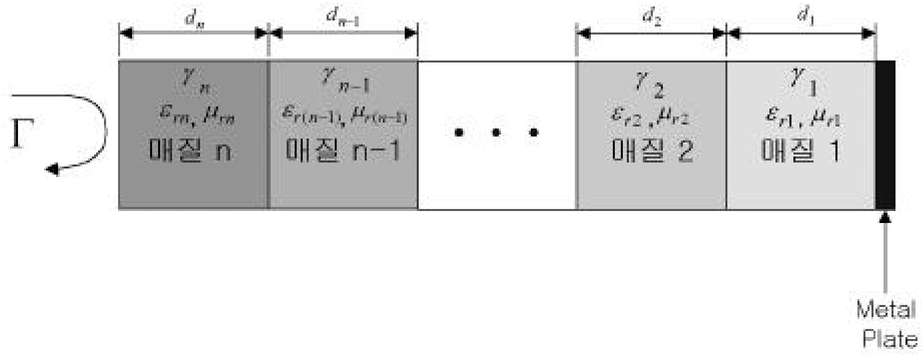


그림 2.6 **다층형 전파흡수체**

Fig. 2.6 Multi-layered Electromagnetics Wave Absorber.

따라서, **허용반사계수를** $|S_0|$**라고 했을 때**, $S_n = (Z_n - 1)/(Z_n + 1) \leq |S_0|$ **을 조건으로하여 전체 두께를 최소로 하는 전파흡수체를 설계하면 된다**. **식** (2.48)**에 의하면 이미 재료 정수를 알고 있는 페라이트를 적층한 경우**, **각 층의 두께를 적절하게 조절함으로써 전체 입력임피던스를 변화시킬 수 있음을 알 수 있다**. **따라서 이미 개발된 전파흡수체 위에 재료정수가 다른 흡수체층을 추가함으로써 기존 단층 전파흡수체로** cover**할 수 없는 주파수대에서도 흡수특성이 뛰어난 전파흡수체를 설계하는 것이 가능하다**[8].

제 3 장 등가재료정수 및 페라이트 전파흡수체의 특성

3.1 등가재료정수법

3.1.1 등가유전율

그림 3.1과 같이 y방향으로 폭 w, x방향으로 두 평판 사이의 간격이 g인 평행판 전송선로에서 z방향으로 전류가 흐르는 경우, z방향의 단위길이당 용량과 인덕턴스를 계산한다. 이때 z = 0에서 평행판 사이의 전위차 V(t)는 일정하며 정상전류가 흐르는 것으로 한다. 아래쪽의 판을 +, 위쪽의 판을 −로 하면 전기장은 +x 방향으로 나온다.

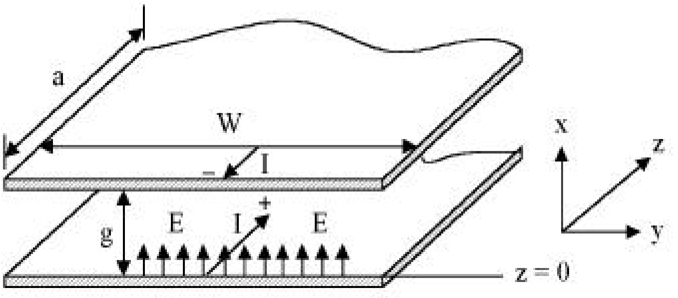


그림 3.1 평행판 전송선로

Fig. 3.1 A Parallel Plate Transmission.

금속판에서 y방향의 폭 w, z방향의 길이 a의 구역에 있는 전하를 Q, 평행도체판간의 총 용량을 C, 전송선로에 채워진 물질의 유전율을 ε이라고 하면 다음 관계가 성립한다.

$$Q = CV \tag{3.1}$$

$$V = gE_x \tag{3.2}$$

$$D = \varepsilon E_x = \frac{\varepsilon V}{g} \tag{3.3}$$

$$Q = w \times a \times D = \varepsilon \frac{wa}{g} V \tag{3.4}$$

따라서, 단위길이당 용량은 식(3.5)과 같다.

$$\frac{C}{a} = \frac{\varepsilon w}{g} \tag{3.5}$$

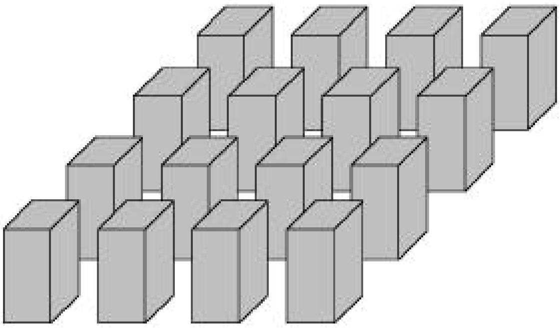


그림 3.2 **주기적으로 배열된 정방형 전파흡수체**

Fig. 3.2 An Eletromagnetic Absorber Composed of Periodic Arrays of Square Ferrite Cylinder.

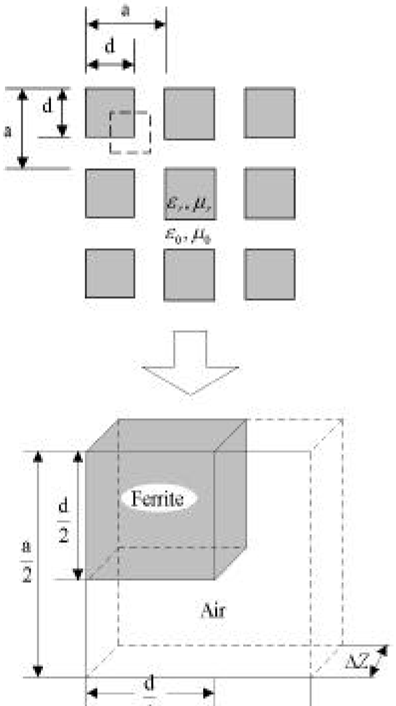
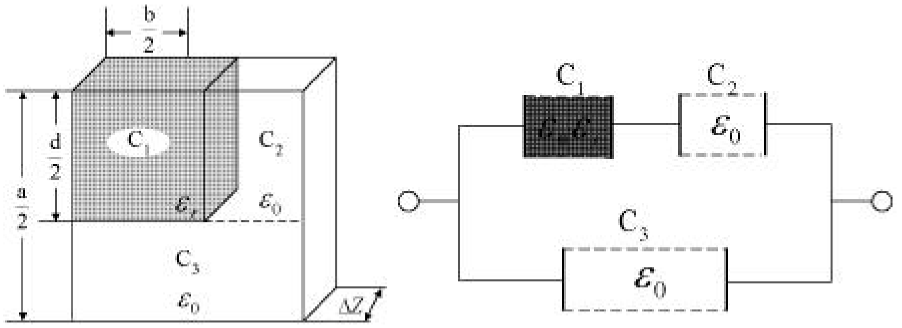


그림 3.3 **등가재료정수의 계산 모델**

Fig. 3.3 A Model for Calculation of Equivalent Material Constants.



(a) (b)

그림 3.4 (a) 등가재료정수의 계산 모델

(b) 합성용량 모델

Fig. 3.4 (a) A Model for Calculation of Equivalent Material Constants.

(b) A Synthesized Capacitance Model.

그림 3.2를 이용하여 그림 3.4와 같은 합성용량 모델을 만들 수 있으며, 총 합성용량 C는 아래와 같이 계산할 수 있다.

여기서,

$$C_1 = \varepsilon_o \varepsilon_r \Delta z,$$

$$C_2 = \frac{d\varepsilon_o \Delta z}{(a-d)},$$

$$C_3 = \frac{(a-d)\varepsilon_o \Delta z}{a}$$

$$C = \left\{ \frac{(a-b)}{a} + \frac{\varepsilon_r d}{(a-d)\varepsilon_r + d} \right\} \varepsilon_o \Delta z \tag{3.6}$$

따라서, 그림 3.3에서 Δz의 두께를 가지는 구조에 대한 등가유전율 ε_{eq}는 식(3.8)과 같이 계산할 수 있다.

$$\varepsilon_{eq} = \frac{C}{\varepsilon_o \Delta z} \tag{3.7}$$

$$\varepsilon_{eq} = \frac{(a-b)}{a} + \frac{\varepsilon_r d}{(a-d)\varepsilon_r + d} \tag{3.8}$$

3.1.2 등가 투자율

이 평행판 또한, 그림 3.1에서 L을 자기인덕턴스라고 하면, ga구역을 자르는 자속은 식(3.9)와 같이 주어진다. 전송선로에서 아래쪽 판에서는 +z방향으로, 위쪽판에서 는 −z방향으로 흐르는 전류를 I, +y방향으로 유기되는 자계를 H, 자속밀도를 B, 전송선로에 채워진 물질의 투자율을 μ, ga를 자르는 자속을 Φ, 평행도체판간의 총 합성인덕턴스를 L이라고 하면 다음 관계가 성립한다.

$$H = \frac{I}{w} \tag{3.9}$$

$$B = \frac{\mu}{w} I \tag{3.10}$$

$$\Phi = B \times g \times a = \mu \frac{g}{w} I \tag{3.11}$$

$$L \frac{dI}{dt} = \frac{d\Phi}{dt} \tag{3.12}$$

식(3.12)는 정상전류에서 식(3.13)과 같다.

$$L = \frac{\Phi}{I} = \mu \frac{ga}{w} \tag{3.13}$$

따라서, 단위길이당 인덕턴스는 식(3.14)와 같이 주어진다.

$$\frac{L}{a} = \frac{g\mu}{w} \tag{3.14}$$

그림 3.3을 이용하여 위와 같은 방법으로 그림 3.5와 같은 합성인덕턴스 모델을 만들 수 있다. 총 합성인덕턴스 L은 아래와 같이 계산할 수 있다.

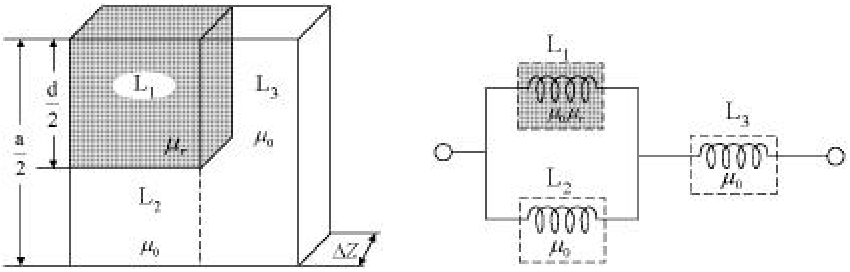
여기서,

$$L_1 = \mu_o \mu_r \Delta z$$

$$L_2 = \frac{d \mu_o \Delta z}{(a - d)}$$

$$L_3 = \frac{(a - d) \mu_o \Delta z}{a}$$

$$L = \left\{ \frac{(a - d)}{a} + \frac{\mu_r d}{(a - d)\mu_r + d} \right\} \mu_o \Delta z \tag{3.15}$$



(a) (b)

그림 3.5 (a) 등가재료정수의 계산 모델

(b) 합성인덕턴스 모델

Fig. 3.5 (a) A Model for Calculation of Equivalent Material Constants.

(b) A Synthesized Inductance Model.

따라서, 그림 3.3과 같은 구조에 대한 등가투자율 μ_{eq}는 식(3.17)와 같이 주어진다.

$$\mu_{eq} = \frac{L}{\mu_0 \Delta z} \tag{3.16}$$

$$\mu_{eq} = \frac{(a - d)}{a} + \frac{\mu_r d}{(a - d)\mu_r + d} \tag{3.17}$$

상기 설명한 방법을 등가재료정수법이라고 한다[9].

3.2. 페라이트의 주파수 분산특성

3.2.1. 페라이트 투자율의 주파수 분산특성

페라이트의 복소비투자율은 주파수 의존성이 크므로, 넓은 주파수 범위에서 사용할 경우 이 점을 고려하여야 한다. 페라이트의 자화기구에는 자벽의 이동과 자화의 회전이 있고, 실제의 자화과정은 이러한 것들이 합성되어 일어난다. 페라이트 투자율의 나이또 주파수 분산식은 식(3.18)과 같다[10].

$$\mu_r = 1 + \frac{K}{1 + jf/f_m} \tag{3.18}$$

여기서, K는 직류(DC)시의 비투자율이며, f는 사용주파수, 그리고 f_m은 완화주파수이다

따라서, 주파수에 따라 μ_r의 변화가 거의 없는 통상의 유전체는 각종 파장의 전파에 대해 재료의 두께를 변화시키면 무반사 조건을 만족시킬 수 있으나, 페라이트와 같이 μ_r이 주파수에 따라 크게 변화하는 경우에는, 특정 두께에서 특정 주파수의 전파에 대해서만 무반사 조건을 만족한다.

또 페라이트의 비초투자율 μ_i와 공명주파수 f_r사이에는 페라이트 흡수체가 우수하게 제조된 경우, 재료의 조성에 관계없이 식(4.18)로 표현되는 Snoek's limit law 가 있다.

$$\mu_i \cdot f_r \leq 5.6 \times 10^3 \ \ \mathrm{MHz} \tag{3.18}$$

3.2.2 페라이트의 주파수 분산특성

페라이트 전파흡수체가 넓은 주파수 범위에서 우수한 특성을 가지려면 입력임피던스가 파장에 대해 거의 일정한 값을 가질 필요가 있다. 이것은 특정 두께를 가지는 전파흡수체에 대해 주파수의 변화가 있더라도 페라이트의 재료정수인 ε_r , μ_r 및 입력임피던스가 일정 범위의 값으로 유지되도록 주파수특성을 가질 필요가 있다는 것을 의미한다.

전파흡수체에 평면파가 수직으로 입사한 경우, 규격화 입력임피던스 $\hat{z}$는 진공중의 전파 임피던스로 규격화하면 식(3.19)와 같이 주어지며 이때의 반사계수 S는 식(3.20)과 같다.

$$\hat{z} = \sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}} \tanh\left(j\ 2\pi \frac{d}{\lambda}\sqrt{\varepsilon_r \mu_r}\right) \tag{3.19}$$

$$S = \frac{\hat{z} - 1}{\hat{z} + 1} \tag{3.20}$$

여기서, 흡수체의 두께가 파장에 비해 매우 작은 경우 식(3.19)은 식(3.21)와 같은 근사식으로 표현할 수 있다.

$|x| \ll 1$ 이면 $\tanh x \quad x - \frac{1}{3}x^3$

$$\begin{aligned} \hat{z} \quad & \sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}} \left\{ j\ 2\pi \frac{\mathrm{d}}{\lambda} \sqrt{\varepsilon_r \mu_r} - \frac{1}{3} \left(j\ 2\pi \frac{\mathrm{d}}{\lambda} \sqrt{\varepsilon_r \mu_r} \right)^3 \right\} \\ & = j\ 2\pi \frac{\mathrm{d}}{\lambda} \mu_r + j \frac{1}{3} \sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}} \left(2\pi \frac{\mathrm{d}}{\lambda} \sqrt{\varepsilon_r \mu_r} \right)^3 \qquad (3.21) \\ & = j\ 2\pi \frac{\mathrm{d}}{\lambda} \mu_r \left\{ 1 + j \frac{1}{3} \left(2\pi \frac{\mathrm{d}}{\lambda} \right)^2 \varepsilon_r \mu_r \right\} \end{aligned}$$

자성손실재료를 사용하는 경우 유전율에는 손실항이 없고 투자율 쪽에만 손실항이 있으므로, 페라이트에서는 $\varepsilon_r''\ \ 0$으로 놓을 수 있다.

식(3.21)에 $\varepsilon_r = \varepsilon_r'$, $\mu_r = \mu_r' - j\mu_r''$을 대입하면 식(3.22)과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{z} \quad & j\ 2\pi \frac{\mathrm{d}}{\lambda} \left\{ (\mu_r' - j\mu_r'') + \frac{1}{3} \left(2\pi \frac{\mathrm{d}}{\lambda} \right)^2 \varepsilon_r (\mu_r' - j\mu_r'')^2 \right\} \\ & = \left\{ 2\pi \frac{\mathrm{d}}{\lambda} \mu_r'' - \frac{2}{3} \left(2\pi \frac{\mathrm{d}}{\lambda} \right)^3 \varepsilon_r' \mu_r' \mu_r'' \right\} + \qquad (3.22) \\ & \quad j \left\{ 2\pi \frac{\mathrm{d}}{\lambda} \mu_r' + \frac{1}{3} \left(2\pi \frac{\mathrm{d}}{\lambda} \right)^3 (\varepsilon_r' \mu_r'^2 - \varepsilon_r' \mu_r''^2) \right\} \end{aligned}$$

전파흡수체의 정합조건식은 식(3.20)의 반사계수 0으로부터 z=1이므로, 정합이 되기 위해서는 식(3.22)의 실수부가 1, 허수부는 0이 되어야 한다.

$$\hat{z} = 1 \qquad (3.23)$$

$$2\pi \frac{\mathrm{d}}{\lambda} \mu_r'' - \frac{2}{3} \left(2\pi \frac{\mathrm{d}}{\lambda} \right)^3 \varepsilon_r' \mu_r' \mu_r'' = 1 \qquad (3.24)$$

$$2\pi \frac{\mathrm{d}}{\lambda} \mu_r' + \frac{1}{3} \left(2\pi \frac{\mathrm{d}}{\lambda} \right)^3 (\varepsilon_r' \mu_r'^2 - \varepsilon_r' \mu_r''^2) = 0 \qquad (3.25)$$

여기서, 파장 λ에 비해 흡수체의 두께 d가 매우 작다면 $\left(2\pi \frac{\mathrm{d}}{\lambda} \right)^3$항은 더욱 작은 값으로 무시할 수 있으므로 식(3.24)은 식(3.26)과 같이 된다.

$$2\pi \frac{\mathrm{d}}{\lambda} \mu_r'' \quad 1 \qquad (3.26)$$

또 주파수가 높은 영역에서 페라이트 투자율의 실수부는 허수부에 비해 매우 작으므로 식(3.25)에서 2항 $\varepsilon_r'\mu_r'^2$ 을 무시하면 식(3.28)와 같이 된다.

$$2\pi\frac{d}{\lambda}\mu_r' - \frac{1}{3}\left(2\pi\frac{d}{\lambda}\right)^3(\varepsilon_r'\mu_r''^2) \quad 0 \tag{3.27}$$

$$\mu_r' - \frac{1}{3}\varepsilon_r'\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\mu_r''\right)^2 \quad 0 \tag{3.28}$$

식(3.28)에 식(3.26)을 대입하면 식(3.29)을 얻을 수 있다.

$$\mu_r' - \frac{1}{3}\varepsilon_r' = 0 \tag{3.29}$$

이상 식(3.26)과 식(3.30)으로 부터 페라이트 전파흡수체의 정합조건을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\mu_r'' = \frac{\lambda}{2\pi d} \tag{3.30}$$

$$\varepsilon_r' = 3\mu_r' \tag{3.31}$$

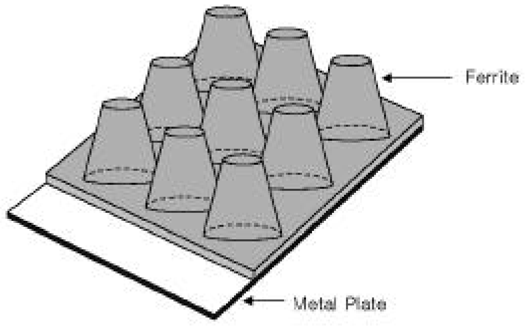
무반사조건의 하나인 식(3.15)에서 유전율의 실수부와 투자율의 실수부는 독립적이지 않고 상관관계가 있음을 알 수 있다. 페라이트는 고주파영역에서 μ_r'이 거의 1로 되며, 이 주파수 영역에서 ε_r'은 주파수특성을 가지지 않고 거의 일정하므로, 이상적인 페라이트 전파흡수체를 구성하기 위해서는 ε_r'을 3정도로 제어되어야 한다는 결론을 얻을 수 있다.

그러나 페라이트 전파흡수체가 주로 사용되는 VHF대 및 UHF대에서 페라이트의 비유전율 ε_r은 거의 일정하여, 고무페라이트에서는 5 8, 소결페라이트에서는 8 16 정도의 값을 가진다.

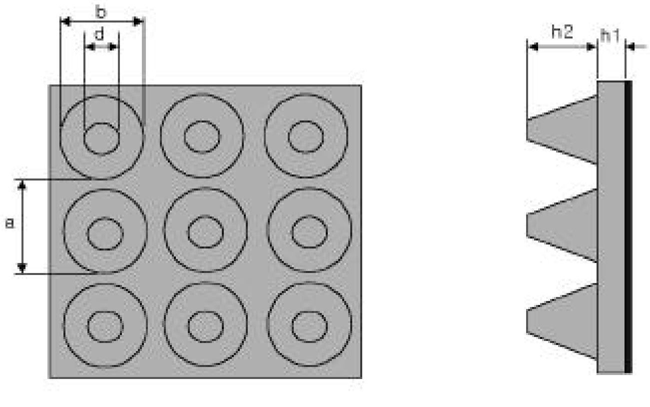
제 4 장 꼭지절단원추형 전파흡수체의 설계

4.1 해석 및 설계

3장에서 설명한 등가재료 정수법을 이용하여 그림 4.1에 제시한 꼭지절단원추형 전파흡수체를 해석하고자 한다.



(a) 사시도



(b) 평면도 (c) 측면도

그림 4.1 원추절단현 전파흡수체의 형상

Fig. 4.1 The Shape of Top-Cut Corn array Wave Absorber.

그림 4.1의 꼭지절단원추형 전파흡수체의 등가재료정수를 구하면 다음과 같다. 우선 그림 에서 보듯이 꼭지절단원추형 전파흡수체는 그 구성이 1층부의 타일형 페라이트와 2층부의 원추절단부로 나뉘어져 있다. 이때, 1층부의 경우 타일형 전체가 페라이트로 채워져 있으므로 1층의 등가유전율 및 등가투자율은 곧 페라이트 타일의 재료정수와 같다.

$$\varepsilon_{eff} = \varepsilon_r \tag{4.1}$$

$$\mu_{eff} = \mu_r \tag{4.2}$$

2층의 경우 원추절단기둥이 있는 부과 공기가 있는 부분이 혼재해 있으므로 먼저 그림 4.2에서와 같이 원추부분을 Δt의 두께를 가지는 여러개의 층으로 근사시킨다[16]. 이를 다층형 전파흡수체의 해석법을 적용하여 그림 4.3과 같이 등가회로화하여 2층부의 등가유전율을 식 (4.1)과 같이 계산할 수 있다. 등가투자율 역시 같은 방법으로 그림 4.4와 같이 등가회로화하여 식 (4.2)와 같이 계산할 수 있다.

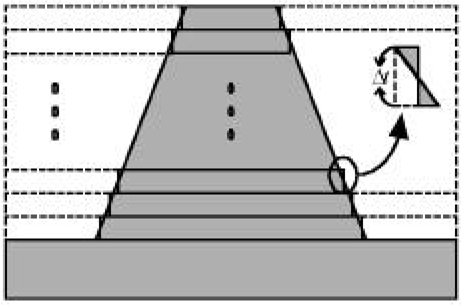


그림 4.2 2층부의 등가재료정수 해석을 위한 영역 근사

Fig. 4.2 Approximation for Equivalent Material Constants of 2nd Layer.

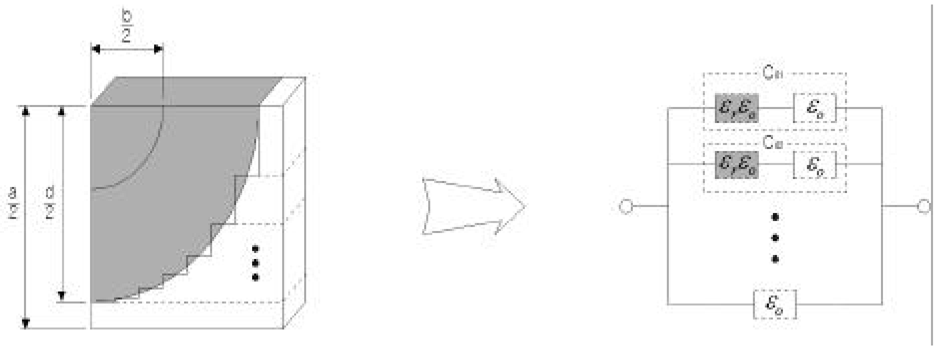


그림 4.3 2층부의 등가용량 모델

Fig. 4.3 Equivalent Capacitance model of 2nd layer.

$$\varepsilon_{eff} = \frac{a \cdot [(a - \Delta t) \cdot \varepsilon_r + \Delta t]}{a(x_{n+1} - x_n) \cdot \varepsilon_r} + \frac{[(a - x_n + n\Delta t)(x_{n+1} - x_n)] \cdot \varepsilon_r}{a(x_{n+1} - x_n) \cdot \varepsilon_r} \tag{4.1}$$

단, x_n은 그림3에서 d/2, n은 해석을 위해 근사시킨 영역의 수를 나타낸다.

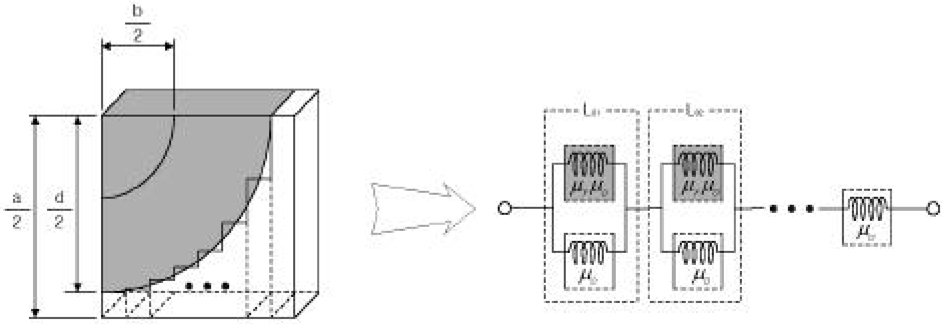


그림 4.4 2층부의 등가유도성 모델

Fig. 4.4 Equivalent Inductance model of 2nd layer.

$$\mu_{eff} = \frac{a \cdot [(a - x_n) \cdot \mu_r + (x_n - n\Delta t)]}{a \cdot \Delta t \cdot \mu_r} + \frac{\Delta t(a - x_n + n\Delta t) \cdot \mu_r}{a \cdot \Delta t \cdot \mu_r} \qquad (4.2)$$

그림 4.5에 꼭지절단원추형 전파흡수체의 설계결과를 나타내었으며, 표 1에 정리하였다. 설계결과에서 보듯이 꼭지절단원추형 전파흡수체의 경우 30 MHz 50 GHz 이상의 대역에서 20 dB 이상의 전파흡수능을 가지고 있음을 알 수 있다. 또한, 표 1에서 보듯이 전체높이가 34.7mm밖에 되지 않아 기존의 피라미드형 전파흡수체가 가지던 1.5 m 가량에 비해 매우 낮은 두께를 가짐으로써 전파무향실에 적용할 경우 실내 유효공간확장에 매우 유리함을 알 수 있다. 또한, 원추의 꼭지 부분을 잘라내어 설계함으로써 설치 및 활용에 있어 인명피해를 최소화 하였다.

표 1. 꼭지절단원추형 전파흡수체의 설계사양 및 흡수특성

페라이트의 재료정수	흡수체의 치수(mm)					20 dB 흡수 대역폭
	a	b	d	h1	h2	
K = 2,500 fm = 2.5 MHz ε_r = 14	20	9	7	6.7	28	30 MHz 50 GHz 이상

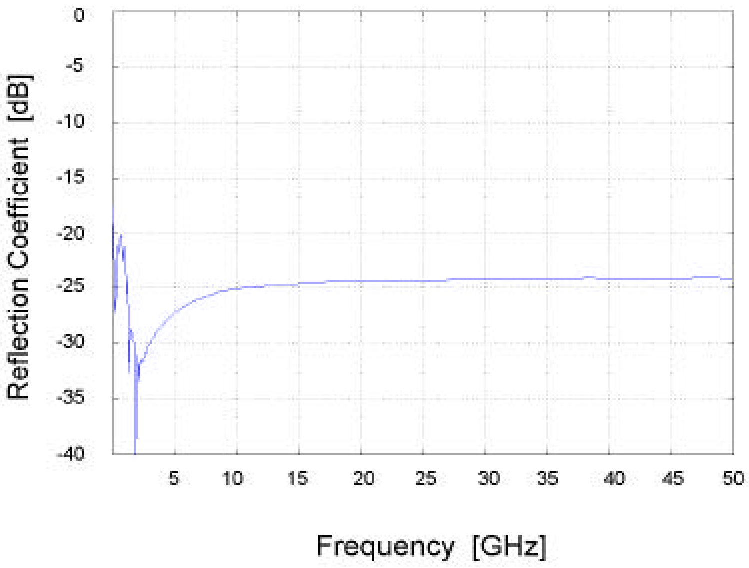


그림 4.5 꼭지절단원추형 전파흡수체의 주파수특성

Fig. 4.5 Caracteristics of the Top-Cut corn array wave absorber.

4.2 제작 및 특성평가

그림 4.6은 제작된 꼭지절단원추형 전파흡수체의 반사감쇠량을 측정하기 위해 고안된 스트립라인 측정시스템을 나타내고 있다. Wiltron 360B Network Analyzer로부터 발생된 신호가 스트립라인을 타고 진행하여 전파흡수체에 도달하게 된다. 그 후에 발생되는 반사파를 측정하여 전파흡수체의 반사감쇠량을 측정하는 것이다.

그림 4.7은 삽입된 꼭지절단원추형 전파흡수체를 나타낸다. 아래위로 각 4개, 총 8개의 전파흡수체가 사용된다. 측정시스템은 상하의 도체판과 가운데의 Center Strip으로 구성되며 이를 지지하기 위해 나무기둥을 세웠다.

위와 같은 측정 시스템을 이용하여 측정한 전파흡수체의 흡수능을 그림 4.8에 나타내었다. 네 개의 그림 중 먼저 좌측 상단의 그림은 측정시스템 전체부분의 반사감쇠량을 나타낸다. 그 반사감쇠량은 전파흡수체에 의한 반사감쇠량 뿐만아니라 스트립라인의 완벽하지 못한 구조로 인한 반사감쇠량도 포함하고 있다. 그림에서 보듯이 스트립라인의 중앙 스트립은 이상적인 완벽한 평면을 이루지는 못한다. 따라서, 원치 않은 반사가 생길수가 있다. 또한 Network Analyzer와 연결되는 커넥터부분에서의 손실도 매우 큰 것으로 측정되어 좌측 상단 그래프의 반사감쇠량은 전파흡수체로 인한 정확한 반사감쇠량을 나타내지는 못한다.

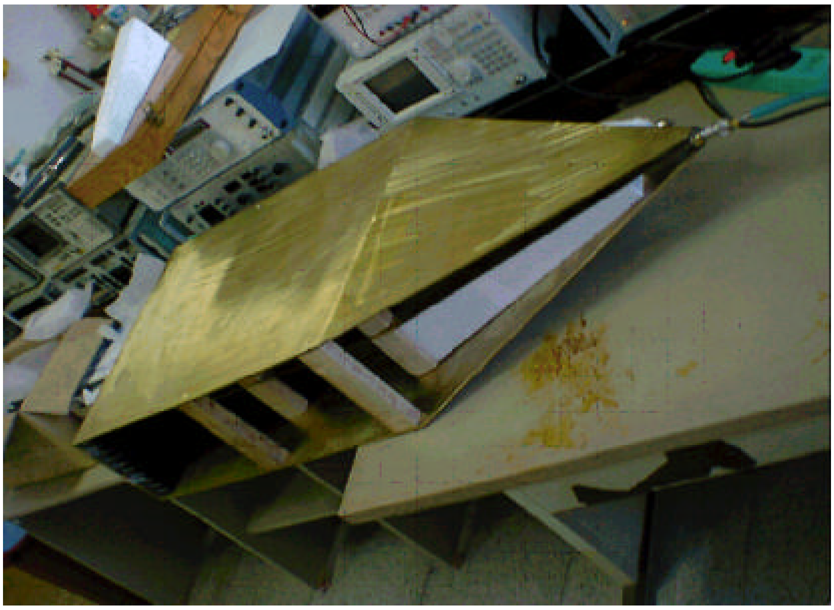


그림 4.6 **전파흡수체 측정시스템**

Fig. 4.6 Measurement System for Wave Absorber.

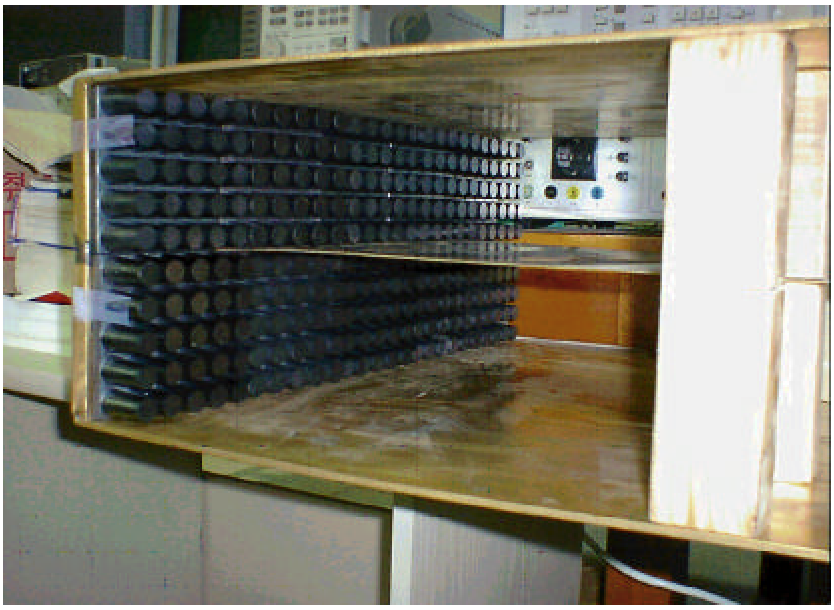


그림 4.7 **측정시스템에 삽입된 전파흡수체**

Fig. 4.7 Wave Absorber in Measurement System.

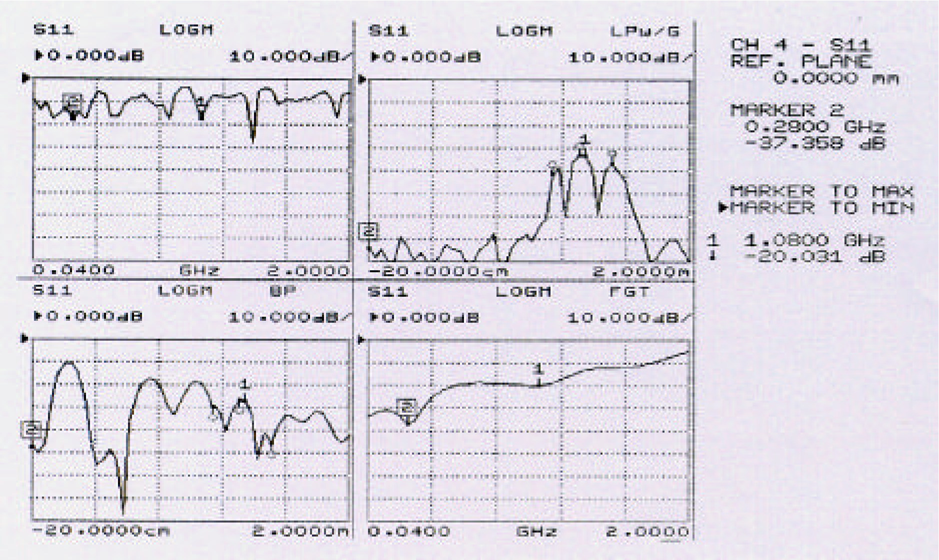


그림 4.8 꼭지절단원추형 전파흡수체의 흡수특성

Fig. 4.8 The Characteristics of Top-Cut Corn array Wave Absorber.

따라서, 본 논문에서는 Wiltron 360B Network Analyzer에서 지원하는 Time Harmonic 기능을 사용하여 x축을 주파수가 아닌 Time(Distance) domain으로 하여 전파흡수체가 놓여져 있는 곳에서의 반사감쇠량을 측정하였다. 그 결과를 나타내는 것이 우측 하단의 그림이다. 우측하단의 그래프를 나타내기 위해 우측 상단의 그래프에서와 같이 x축을 거리로 하여 전파흡수체가 있는 곳까지의 거리를 측정하여 그 곳에서의 반사감쇠량만을 볼 수 있도록 기능을 설정하였다. 우측 상단의 그래프에서 1로 Marking 된 지점이 전파흡수체가 있는 곳을 나타내며 그 좌우의 포인터는 전파흡수체 앞뒤로의 일정한 두께를 가정한다. 즉, 1로 표시된 지점에서 앞뒤로 일정한 두께를 준 영역에서의 반사감쇠량만을 측정하는 것이며 그 결과가 우측 하단의 그래프이다.

이제 우측 하단의 그래프를 살펴보면, 가장 위쪽의 선이 기준선인 0 dB를 나태내고 측정주파수 대역은 40 MHz에서 2 GHz까지이다. 그림에서 알 수 있듯이 40 MHz부터 약 1 GHz까지의 대역에서 20 dB 이상의 전파흡수능을 나타내고 있다. 이는 기존의 타일형과 그리드형보다 양호한 특성을 가지는 것이다.

본 실험에서는 사용가능한 주파수 대역이 300 MHz 500 MHz에 이르는 스트립라인을 이용하여 측정을 하였기 때문에 1 GHz 이상의 대역은 새로운 측정 시스템을 사용하여 재측정할 예정이다.

제 5 장 결 론

인체에 대한 유해성으로 인해 전자기기의 수출, 수입이 현재 국가간의 교역에 있어 심각한 문제로 대두되고 있다. 현재 세계 각국은 자국에 수입되는 전자제품의 EMI/EMC 특성이 불량할 경우 여러 가지 제재를 가하는 실정이다. 이러한 추세에 EMI/EMC 시험에 반드시 필요한 전자파암실용 전파흡수체의 개발은 필연적이라고 할 수 있다.

따라서, 본 논문에서는 전자기기등에서 방사되는 전자파를 측정하는데 있어 반드시 필요한 전파암실에서 사용되는 전파흡수체의 설계와 제작에 대해 연구하였다.

현재 전파암실용 전파흡수체의 세계 규격을 주도하고 있는 CISPR가 1998년 제시한 확장대역을 포함하여 30 MHz 18 GHz에서 20 dB의 전파흡수능을 가지는 전파흡수체는 국내뿐만 아니라 외국에서도 그 예가 없다. 따라서, 본 논문에서는 국제규격을 만족시킴은 물론 페라이트를 이용하여 4 cm 미만의 두께를 실현하기 위해 꼭지절단원추형이라는 새로운 형태의 페라이트 전파흡수체를 설계하고 제작하여 그 특성을 보였다. 시뮬레이션 결과 제안한 전파흡수체는 34.7 mm라는 현저히 낮은 두께를 가지면서도 30 MHz 50 GHz 이상에 이르는 초광대역에서 20 dB 이상의 전파흡수능의 설계결과를 보였다.

나아가서, 꼭지절단원추형 전파흡수체를 실제로 제작하고 측정함으로써 그 특성을 분석하였다. 전파흡수체의 반사감쇠량을 평가하기 위한 측정시스템을 스트립라인형태로 제작하여 전파흡수체의 반사감쇠량을 측정한 결과 40 MHz에서 약 1 GHz까지 20 dB의 전파흡수능을 가짐을 확인하였다. 그러나, 스트립라인을 이용한 측정시스템은 사용가능 상한 주파수가 300 MHz 500 MHz 정도밖에 이르지 못하므로 1 GHz 이상의 대역에서의 전파흡수능은 새로운 측정시스템을 이용하여 측정하여야 할 것이다. 금후 현재 전파무향실에 직접 적용하여 1 GHz 이상의 대역에서의 전파흡수능을 측정할 필요가 있다.

참고문헌

[1] 김동일, 전상엽, “EMI/EMC 대책용 광대역화 전파흡수체의 개발에 관한 연구”, 한국항해학회지 제15권 제4호, pp. 13-35, 1991. 12.

[2] CISPR/B/220/RVC, CISPR11, Nov. 8. 1998.

[3] 김동일, 전상엽, 정세모, “제2층에 십자형 슬롯을 가지는 2층형 초광대역 전자파 흡수체의 개발”, 한국전자파학회 종합학술대회 논문집, pp. 8-12, 1995.

[4] David M. Pozar, *Microwave Engineering*, Addison-Wesley, 1990

[5] 김동일, 안영섭, 정세모, “전파흡수체의 전파흡수특성 측정기법에 관한 연구”, 한국항해학회지, 제16권 제4호 pp. 25-34, 1992. 12.

[6] Y. Naito et al., "Anechoic chamber fitted with ferrite grid or ferrite multi-layer electromagnetic wave absorbers", EMC'94 ROMA, pp. 229-234, Sept. 1994.

[7] 김동일, 박지용, “소결페라이트/유전체/고무페라이트 3층구조를 이용한 전파흡수체의 광대역화에 관한 연구”, 한국전자파학회 종합학술발표회논문집, pp. 115-119, 1996.

[8] 김동일, 박지용, “광대역특성을 갖는 다층구조 페라이트 전파흡수체의 최적설계”,한국통신학회 부산ㆍ경남추계합동학술발표회, pp. 58-62, 1996.

[9] Dong Il Kim, Michiharu Takahashi, Hiroki Anzai, Sang Yup Jun, "Electromagnetic wave absorber with wide-band frequency characteristics using exponentially tapered ferrite", IEEE Transactions on electromagnetic compatibility, Vol.38, No.2, pp. 173-177, May. 1996.

[10] 內藤喜之 外, “フェライト電波吸收體の整合周波數についで”、日本電子通信學會論文誌B, 52-B, 7, pp.398-404, 1969. 1.

[11] 김동일, 박종구, 원영수, “ 십자돌기형 페라이트 전파흡수체의 광대역 설계 ”, 한국전자파학회논문지 제11권, 제3호, pp. 372-378, 2000. 4

본 연구와 관련된 발표논문 및 학술대회발표

☞ 발표논문

1. 김동일, 박종구, 원영수, "십자돌기형 페라이트 전파흡수체의 광대역 설계", 한국전자파학회논문지 제11권, 제3호, pp. 372-378, 2000. 4

☞ 학술대회발표

1. 김동일, 박종구외, "기둥형 돌기부를 가지는 광대역 페라이트 전파흡수체의 설계", 한국해양정보통신학회지, Vol. 3, No. 1, pp. 432-436, 1999. 5.
2. 김동일, 박종구, 정연춘, "십자돌기형 및 테이퍼진 십자돌기형 전파흡수체의 설계", 마이크로파 및 전파 학술대회 논문지, Vol. 22, No. 2, pp. 197-200, 1999. 9.
3. 김동일, 박종구, 원영수, 이영구, "원추절단형 및 원기둥형 광대역 페라이트 전파흡수체 개발에 관한 연구",마이크로파 및 전파 학술대회 논문지, Vol. 23, No. 1 pp. 505-508, 2000. 5.
4. 김동일, 박종구, 정세모, 이영구, "원추절단형 페라이트 전파흡수체의 최적설계 및 제작에 관한 연구", 한국해양정보통신학회 추계 종합학술대회 논문지, Vol. 4, No. 2, pp. 153-156, 2000. 10.