

工學碩士 學位論文

센더스트를 이용한 적층형 전파흡수체의 개발

*Development of Multi-layer Electromagnetic Wave  
Absorbers Using Sendust*

指導教授 金 東 一

2007年 2月

韓國海洋大學校 大學院

電 波 工 學 科

柳 在 旻

本 論 文 을 柳 在 旻 의 工 學 碩 士  
學 位 論 文 으 로 認 准 함

委 員 長 : 工 學 博 士 鄭 世 謨 (印)

委 員 : 工 學 博 士 朴 東 國 (印)

委 員 : 工 學 博 士 金 東 一 (印)

2007 年 2 月

韓 國 海 洋 大 學 校 大 學 院

電 波 工 學 科

柳 在 旻

# 목 차

<i>Nomenclature</i> .....	iii
<i>Abstract</i> .....	v
제 1 장 서 론 .....	1
1.1 연구 배경 .....	1
1.2 연구 목적 .....	3
제 2 장 전파흡수체 이론 .....	5
2.1 서론 .....	5
2.2 전파흡수체의 재료 .....	8
2.3 전파흡수체의 종류 .....	10
2.4 전파흡수체에 요구되는 특성 .....	15
2.5 전파흡수체의 해석 이론 .....	17
2.5.1 단층형 전파흡수체의 해석 이론 .....	17
2.5.2 적층형 전파흡수체의 해석 이론 .....	19
2.6 전파흡수체의 분포정수회로화 .....	22
2.6.1 파동방정식 .....	22
2.6.2 분포정수회로화 .....	26
2.7 전파흡수체의 반사계수 측정 방법 .....	32
2.8 재료정수 측정법 .....	34
2.8.1 사용된 Sample Holder .....	34
2.8.2 재료정수 계산방법 .....	35

제 3 장 전과흡수체의 제작 및 특성평가 .....	39
3.1 전과흡수체의 설계 및 제작 .....	39
3.2 센터스트의 성분비에 따른 전과흡수능 및 재료정수 측정 .....	40
3.2.1 센터스트의 성분비에 따른 전과흡수능 .....	40
3.2.2 재료정수 측정 .....	43
3.3 센터스트를 이용한 적층형 전과흡수체 .....	46
3.3.1 센터스트를 이용한 적층형 전과흡수체 설계 및 제작 .....	46
3.3.2 전과흡수능 평가 및 분석 .....	47
3.4 수산화알루미늄을 첨가한 적층형 전과흡수체 .....	50
3.4.1 수산화알루미늄을 첨가한 적층형 전과흡수체의 설계 및 제작 .....	50
3.4.2 전과흡수능 평가 및 분석 .....	51
제 4 장 결 론 .....	54
참고문헌 .....	56
본 논문과 관련된 발표논문 .....	58

## *Nomenclatures*

$\mathbf{B}$	:	Magnetic Flux Density Vector
$C$	:	Capacitance
$\mathbf{D}$	:	Electric Flux Density Vector
$d_n$	:	Thickness of n-th Layer
$\mathbf{E}$	:	Electric Field Vector
$G$	:	Conductance
$\mathbf{H}$	:	Magnetic Field Vector
$I$	:	Current
$I_1$	:	Current in the Air Region(Input)
$I_2$	:	Current in Sample
$\mathbf{J}$	:	Electric Conduction Current Density Vector
$L$	:	Inductance
$R$	:	Resistance
$V$	:	Voltage
$V_1$	:	Voltage in the Air Region(Input)
$V_2$	:	Voltage in Sample
$Y$	:	Admittance
$Z$	:	Impedance
$\mathbf{Z}_c$	:	Characteristic Impedance
$z_n$	:	Input Impedance of nth Layer
$\alpha$	:	Attenuation Constant
$\beta$	:	Phase Constant
$\gamma$	:	Propagation Constant

$\varepsilon$	:	Permittivity
$\varepsilon_{eq}$	:	Equivalent Permittivity
$\varepsilon_0$	:	Permittivity of Vacuum
$\varepsilon_{rn}$	:	Relative Permittivity of nth Layer
$\lambda$	:	Wavelength
$\mu$	:	Permeability
$\mu_{eq}$	:	Equivalent Permeability
$\mu_i$	:	Initial Permeability
$\mu_0$	:	Permeability of Vacuum
$\mu_{rn}$	:	Relative Permeability of nth Layer
$\sigma$	:	Conductivity
$\omega$	:	Angular velocity

# *ABSTRACT*

## *Development of Multi-layer Electromagnetic Wave Absorbers Using Sendust*

The remarkable advance of modern electronics and communication technology has made high frequency conversion, miniaturization, digitalization. However, EM (Electromagnetic) wave environments have become more complicate and difficult to control. Therefore, international organizations such as the ANSI (American National Standards Institute), FCC (Federal Communications Commission), and CISPR (the Committee International Special des Perturbations Radioelectrique), etc. have provided international or local standards for the EM wave environments and for the EMC (Electromagnetic Compatibility).

EM wave absorbers are used to protect electronic devices, such as personal communications and wireless LAN systems from unwanted EM wave radiations. In order to develop a more advanced EM wave absorbers, it is important to develop new materials for EM wave absorbers instead of soft and hard magnetic materials, such as Mn-Zn, Ni-Zn, Ba, and Sr ferrites which have been used conventionally.

In this thesis, the experiments for two kinds of materials. First, Multi-layer EM wave absorbers were studied using Sendust. As a result, the bandwidth of the Multi-layer EM wave absorbers with the thickness of 4 mm using Sendust was obtained more than 10 dB in S-Band. Secondly, the mixing effects of Sendust and  $Al(OH)_3$  on Multi-layer EM wave absorbers were studied, where it was confirmed that the bandwidth of the multi-layer EM wave absorbers inter-mixing  $Al(OH)_3$  with the thickness of 3 mm has broadened compared with non-mixed Multi-layer Sendust EM wave absorbers in S-Band.

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구 배경

현대과학의 눈부신 발전은 전기·전자기기의 고주파화, 소형화, 디지털화를 이끌었으며 이로 인해 인류는 매우 편리한 생활을 영위하고 있다. 그러나 이와 같은 현대과학의 고도성장과 함께 이들 첨단화된 전자기기에서 방사되는 전자파가 전자기기 상호간 또는 인체에 악영향을 준다는 연구결과가 발표되면서 이를 해결하고자 하는 노력이 많은 연구자들에 의해 이루어지고 있다.

전자파가 전자기기 상호간 또는 인체에 악영향을 주는 예로는 TV의 고스트(Ghost) 문제에 의한 수신 장애, 전자레인지가 방사하는 인체에 유해한 전자파 문제, 그리고 최첨단 전자기기 등에서 발생하는 전자파 장애로 인한 기기 상호간의 오동작 문제 등을 들 수 있다[1]. 또한 이러한 전자기기의 발달은 전자파 노출에 의한 인체에의 유해 여부에 대한 논란을 낳았다. 특히 의도적 전자기장 복사를 이용하는 무선통신 및 방송 시스템 즉 방송국 송신소, 이동전화 기지국 및 이동전화 등에 대한 전자파 위험성에 대한 국민적 관심이 날로 증가하고 있다. 또한 일부에서는 고압선, 레이더, 이동전화 및 그 기지국 등에서 발생하는 전자파에 대한 노출이 건강에 해로운 결과를 초래할 수 있다는 우려를 표명해왔고, 결과적으로 일부 국가에서는 새로운 전력선과 이동전화망의 구축이 논란의 대상이 되고 있는 실정이다.

특히, 전자파에 대한 인체에의 유해성 문제는 유무해와 관련된 논란에만 그치는 것이 아니다. 전자파의 활용 없이 문명생활이 불가능하다고 할 만큼 우리는 전자파를 우리의 일상생활 전 영역에서 활용하고 있으며, 특히 우리나라의 주력산업인 IT산업 전반이 전자파와 밀접한 관계를 가지고 있다. 그러므로 과학적으로 확인되지 않은 유무해성 논란이 지속될 경우 궁극적으로 경제활동에 타격을 줄 수도 있다[2].

이에 대한 대책으로, 국제적으로는 국제무선장해특별위원회(CISRP ; Committee International Special des Perturbations Radioelectrique), 미국에서는 미연방통신위원회(FCC ; Federal Communications Commission), 미국국가표준협회(ANSI ; American National Standards Institute) 등에서 규제를 만들

어 시행하고 있다.

한편, EMS(전자파내성)에 대한 규격도 차츰 엄격해져 가고 있으며, 우리나라에서도 2000년부터 EMS 규제를 국내법으로 제정하여 시행하고 있다. 이와 같은 국제적 규제는 단순히 자국 내의 규제에 머무르지 않고 산업적으로는 무역장벽으로 이용되어, 이에 대한 대책기술 없이는 전자·제어·통신기기의 수출이 불가능한 상황으로 전개되고 있다. 이러한 전자파장해에 대한 대책을 수립하기 위해서는 불요전자파의 방지를 억제하기 위한 EMI 제어 및 EMI 측정이 필수적이며 EMC(Electromagnetic Compatibility) 분야에서는 전자파환경의 정량화, 전자계 분포의 측정 및 저자펄스의 측정 등이 필요하다[3]-[5].

이러한 방사파의 측정은 무한히 넓은 자유공간에서 행하는 것이 이상적이나 현실적으로 외부전파의 영향을 받지 않는 자유공간을 확보하기가 곤란하며 옥외 측정 시 주변건물, 지면 및 기후 등에 영향을 받지 않는 자유공간을 확보하기가 곤란하며 옥외 측정 시 주변건물, 지면 및 기후 등에 의해 영향을 받으므로 전파흡수체를 이용하여 전파적으로 자유공간과 등가인 전파무향실을 구성하여 측정을 행하고 있다. 이와 같은 전파무향실을 구성하기 위해서는 특성이 우수한 전파흡수체가 필요하며 현재 자성체 재료 및 카본함유 등을 조합한 다양한 전파흡수체가 개발되어 이용되고 있다.

전파흡수체는 도전손실재료, 유전손실재료, 자성손실재료 등을 이용하여 입사한 전자파를 흡수해서 열로 변환하여 반사파가 생기지 않게 하는 특수재료이다. 전파 흡수체의 역사로 볼 때 1960년대에 개발되어 전파암실(전파무향실)이나 안테나의 지향성 개선 등에 널리 사용되어 왔다[6]-[8].

전파흡수체는 전자파 사용초기부터 무반사 종단기 등에 이용되었으며, 그 후 공간을 전파하는 전자파를 흡수 또는 차폐하는 전파흡수체가 개발되어 전파무향실이나 안테나 지향성 개선 등에 널리 사용되고 있다. 이후 마이크로파 중계에 의한 다중통신기술의 개발, 항공기 및 미사일 등과 같은 이동물체의 전파유도기술의 개발 등과 함께 안테나, 전파전달의 조사·연구를 위한 측정평가용 전파무향실의 구성, TV나 레이더 허상방지용 등 전파흡수체의 주된 용도 중 하나인 전파무향실의 주파수 대역은 고주파 이용 장비가 증가함에 따라 커버할 수 있는 대역폭이 확장될 것으로 전망되므로 국제규격기준에서 요구하는 기준을 만족시키기 위해 보다 얇은 두께에서도 이러한 요구를 만족시킬 수 있도록

광대역화 되어야 하며 이를 위한 새로운 재료의 개발이 요구되고 있다. 그리고 전자파 장애문제를 해결하기 위해서는 외부에서 들어오는 불필요한 전자파를 흡수하여 열로 변환하는 전파흡수체의 개발이 매우 효과적이다. 이러한 전파흡수체는 주파수 의존 특성이 매우 커서 사용하고자 하는 주파수 대역에서 자기적, 전기적, 그리고 유전손실이 큰 재료를 이용하거나 이들을 혼합하여 최대의 손실특성을 나타내는 재료를 만드는 기술 개발이 필요하다. 이와 같은 연구개발은 전기적 손실이나 유전적 손실에 비해 자성손실이 크기 때문에 주로 자성 재료를 기초로 하여 이루어지고 있다.

## 1.2 연구 목적

현재 전자파 장애 대책을 위한 전파흡수체는 TV 고스트 방지용 전파흡수체, 레이더 전자파의 흡수를 위한 RAM 및 각종 전자기기로부터의 전파누설 방지용 등으로 널리 사용된다. 하지만 주원료로 이용되는 페라이트(ferrite) 외의 자성 재료를 이용한 전파흡수체에 대한 연구는 그리 많지 않다. 특히 단층의 쉬트(sheet)형 전파흡수체의 전파흡수능 향상과 광대역화를 위한 연구가 조성변화에 따른 흡수특성 변화를 중심으로 이루어지고 있다. 그러나 같은 조성을 갖는 시편일지라도 제작방법에 따라 물리적, 전자기적 특성이 크게 변할 수 있으므로 제작방법에 따른 특성 변화도 함께 연구되지 않으면 안 될 중요한 연구 분야인 전파 흡수체는 주파수 의존 특성이 매우 커서 사용하고자 하는 주파수대역에서 자기적, 전기적, 유전손실이 큰 재료를 이용하거나 이들을 혼합하여 최대의 손실특성을 나타내는 재료를 만드는 기술 개발이 필요하다.

이와 같은 연구는 전기적 손실이나 유전적 손실에 비해 자성손실이 크기 때문에 페라이트 같은 주로 자성 재료를 기초로 하여 이루어지고 있다[9]. 일반적으로는 soft 페라이트인 Mn-Zn 페라이트와 Ni-Zn 페라이트는 전파흡수체의 전파흡수능에 영향을 주는 자기적 손실이 높기 때문에 전파흡수체에서 매우 중요한 재료이다. 그러나 이러한 soft 페라이트는 GHz 대역에서 자기적 손실이 급격하게 줄어들기 때문에 GHz 대역의 주파수에서 좋은 전파 흡수체로서 기능을 나타내지 못한다. 그러나 Sr 페라이트와 Ba 페라이트 같은 Hard 페라이트

는 GHz 대역의 주파수에서 자기적 손실이 증가되므로 GHz 대역용 전파흡수체로서 매우 유용한 재료라 할 수 있다. 더구나 전자기기의 급격한 고주파화 추세를 감안하면 GHz 대역용 전파흡수체의 개발에 관한 연구는 매우 중요하다. 그러나 아직까지는 이러한 한정된 재료만을 이용하고 있어 다양한 각도에서의 연구개발이 필요하다.

따라서 본 논문에서는 지금까지 전파흡수체에 대표적인 재료로 사용되어 오던 페라이트를 대신하여 처음으로 자성손실재료인 센더스트를 이용한 전파흡수체를 제작한 후 적층하여 그 특성을 조사하였다. 전파흡수체를 개발하는데 있어 새로운 방법인 센더스트를 사용하여 적층함으로써 새로운 전파흡수체의 개발 가능성을 제시하였고, 이를 이용한 레이더용 전파흡수체를 개발하였다. 최종적으로 S-Band 레이더용 전파흡수체 개발을 목표로 센더스트의 재료정수인 복소비유전율과 복소비투자율 값을 MATLAB으로 계산하였다. 그리고 성분비를 달리해서 제작한 센더스트 전파흡수체를 적층하여 S-Band에서 10 dB 대역폭 확장을 꾀하였고, 센더스트와 수산화알루미늄을 각각 성분비를 달리하여 혼합한 후 전파흡수체를 적층하여 S-Band에서 10 dB 대역폭을 증가시키는 방법을 연구하였다.

## 제 2 장 전파흡수체 이론

### 2.1 서 론

인류과학의 발전에 따라 전자기파의 응용이 점점 광범위해지고 세분화 되면서 전자파환경 대응성 또는 전자파환경 양립성 Electromagnetic Compatibility(EMC), 전자파 장애 Electromagnetic Interference(EMI)는 점점 중요한 문제로 부각 되고 있다. EMC 또는 EMI 관련 대책 방법은 여러 가지가 있다. 예를 들면 접지(Grounding), 차폐(Shielding), 흡수(Absorbing)의 방법이 있는데 차폐에 의한 방법은 내부 발진기가 간섭을 일으킬 뿐만 아니라 차단벽 등에 틈이 있는 경우에는 그 효과가 현저히 저하되는 단점을 가지고 있다. 반면에 흡수에 의한 방법은 불요 전자파를 열에너지로 변환하는 방법으로 내부 발진기 등이 안정하고 틈이 있는 경우에도 충분히 활용 가능하여 매우 유용한 방법으로 평가 받고 있다. 특히 전파무향실, 교량에 의한 레이더의 허상 방지용 전파 흡수체, 무선 LAN 등에서의 전파 장애 방지대책, 군사적 레이더에 탐지되지 않는 무기 개발에서의 전파흡수체는 매우 중요한 자리를 차지하고 있다. 따라서 이러한 Absorbing을 이용한 전파흡수체의 연구개발이 활발히 진행되고 있다.

전파흡수체는 이와 같이 다양한 분야에서 널리 이용되며, 이러한 전파흡수체는 그 사용목적에 어울리는 여러 가지 형상이나 구성으로 이루어지지만, 크게 분류하면 야외에 사용하는 박형 전파흡수체, 전파암실 내에 사용하는 피라미드나 웨지(wedge) 형상 등의 다층형 전파흡수체, 또한 간이 용도의 도료형 전파흡수체 등 각양각색의 것이 실용화되어 있다[10]. 전파흡수체에 요구되는 주요 특성으로 전파흡수능이 우수하고 전파흡수대역이 넓어야하며 박형인 것이 요구된다. 매질에 전자기파가 입사하면 반사(Reflection), 흡수, 회절(Geometrical Theory Diffraction/Uniform GTD)과 같은 3가지 반응이 나타난다. 첫째, 반사는 주파수가 증가함에 따라 전기장 임피던스는 감소하여 반사손실(Reflection loss)은 줄어든다. 반면, 주파수 증가에 따라 자기장 임피던스는 증가하고 반사손실은 증가한다. 둘째, 흡수는 RF 신호가 전기 에너지에서 열에너지로 전환될

만큼 도체가 충분히 두꺼울 때 흡수현상이 일어난다. 전도체의 두께가 최소한 표피두께(skin depth)가 되지 않으면 흡수에 의한 감쇄는 일어나지 않는다. 셋째, 회절 관점에서 역 산란파는 반사파와 회절파의 합으로 표현한다.

제 1세대의 특징은 현재에도 TV 전파의 불요반사파 흡수로서 계속되고 있다. 제 2세대의 특징은 주파수가 마이크로파대에 있지만, 제 3세대의 현재는 하한 주파수가 30 MHz ~ 1000 MHz의 주파수 범위에서 전자기기의 누설 전파 제어가 정해지고 있고, 이것을 측정하는 전파암실을 구축하기 위해서는 이 주파수 범위에 있어서 충분한 반사 감쇠량을 가지는 흡수체를 개발할 필요가 있다. 따라서 금후 30 MHz 이상의 주파수를 만족하는 두께가 얇은 흡수체의 개발 연구가 필요하고 이것이 제 4세대라고 불릴 수 있다.

전파의 흡수란 전파에너지가 열에너지로 변환되는 현상이며 이와 같은 현상을 적극적으로 이용하여 반사파가 생기지 않게 하는 특수재료가 전파흡수체이다. 이상적인 전파흡수체는 입사해온 전파에너지를 모두 열에너지로 변환시키는 것이다[11]. 당초에는 적의 레이더에 잠수함이나 비행기가 탐지되지 않도록 하는 등의 군사 장비면에서의 요구나 전파암실을 구축하기 위해 이용하는 것이 주된 목적이었다. 그러나 근래에 들어서는 전자레인지(microwave oven)나 컴퓨터 등 우리 주변에서 전자파가 많이 이용되고 있으며, 이들 전자기기에서 방사된 불요 전파가 다른 전자기기에 악영향을 주고 있다. 이와 같이 전파환경이 악화 일로로 가는 상황에서 각종 전파흡수체를 필요로 하는 경우가 증가되어 왔다. 이외에도 전자파가 인체에 미치는 영향의 논란은 최근 주목되고 있으며, 전자파 방해 대책용으로서의 전파흡수체의 이용은 점점 활발해지고 있다.

이러한 전파흡수체의 원리는 검은 천으로 주위가 가려진 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 중요시되면서 갖추기가 어려운 것이 전자파의 출입을 제한하는 공간을 구성하는 것이다. 이와 같이 전자파의 출입을 제한하는 공간을 전파암실이라 하고, 이곳에서 광학 실험실의 검은색 커튼과 같은 역할을 하는 것이 전파흡수체이다.

만약에 전기에너지를 갖고 있는 건전지에 전구를 연결하면 전구는 빛을 방사

하는 동안 뜨거워진다. 이것은 전기에너지가 변화하여 빛과 열에너지로 변화하는 것을 보여주는 것이다. 일반적으로 전기에너지를 열에너지로 변화시키는 물체를 저항체라고 하는데 전구의 경우는 텅스텐을 저항체로 사용한다. 전파흡수체도 저항체 성질을 갖게 되는 여러 가지 재료들을 알맞게 혼합하여 흡수체 내부의 임피던스를 공간의 임피던스와 정합되도록 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 저항체, 손실재료 등이 있다. 손실재료의 분포정수회로(전송선로)의 기본식과 평면파의 미분방정식을 비교해보면 저항과 컨덕턴스는 각각 복소투자율의 허수항과 복소유전율의 허수항에 대치되며 도전율은 복소유전율의 허수항에 추가된다. 결국 도전손실재, 자성손실재, 유전손실재 중의 하나 또는 이들의 조합으로 전파흡수체가 형성된다. 이들의 사용방법은 아래 3가지로 크게 분류할 수 있다.

- ① 전파가 몇 번이고 손실재에 부딪혀 그때마다 전파에 손실을 부여하는 경우 : 그 대표적인 예가 전자레인지이며 안에 넣은 식품이 손실재가 된다.
- ② 전파 1회 밖에 손실재료에 부딪히지 않는 경우 : 그 대표적인 예는 TV 신호의 반사 방지에 사용되는 손실재이다.
- ③ 어떤 정해진 통로(전송선로)를 통과하는 전자파에 손실을 부여하는 경우 : 그 대표적인 예로는 동축케이블 주위에 붙인 손실재나 전자레인지용 누설방지 손실재가 있다.

이와 같이 전파흡수체는 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 전파흡수체의 재료

전파흡수 재료에는 여러 종류의 것이 있지만, 크게 다음의 3가지 종류로 분류된다.

- ① 도전성 전파흡수재료
- ② 유전성 전파흡수재료
- ③ 자성 전파흡수재료

우선, 도전성 전파흡수재료란 저항체에 전류를 흘리면 흐르는 전류에 의해 열이 발생한다. 이와 마찬가지로 유한한 도전율을 가지는 매질에 전계가 가해지면 도전전류가 흘러서 전자파 에너지는 열로 변환된다. 이와 같은 도전성 손실재료에는 도전성섬유를 부직포 형태로 짜서 만든 베나 산화인듐 방울을 증착한 유전체 시트 등이 있다.

유전성 손실재료에는 카본고무, 카본을 포함하고 있는 발포우레탄, 카본을 포함하고 있는 발포폴리스티렌 등이 있다. 이런 종류의 흡수체를 이용해 광대역 특성을 얻고자 할 경우에는 다층 구조로 해서 표면 가까이의 감쇠를 작게 하고, 내부에 들어옴에 따라 감쇠를 크게 한다. 이 경우 각 층의 감쇠분포를 어떻게 주는가가 중요한 문제이다.

자성 손실재료의 대표적인 것은 페라이트이다. 금속판으로 뒤를 붙인 페라이트 판은 비교적 넓은 주파수에 걸쳐 좋은 흡수특성을 나타낸다. 정합하는 주파수는 재질에 의해 결정되고 대강 0.3 ~ 1.5 GHz의 범위에 있다. 흡수체의 두께는 얇고 대부분의 것은 주파수에 관계없이 5 ~ 8 mm이고 기존의 것 중 제일 얇은 것은 700 MHz용 전파흡수체로서 그 두께는 0.8 mm이다. 또 페라이트 분말을 고무에 섞어 혼합한 고무 페라이트는 유연성을 가지며, 고무에 대한 페라이트 혼합비에 의해 정합주파수를 바꿀 수 있다.

여기서 위에서 3가지로 분류한 전파흡수 재료의 차이를 전기적 재료정수의 관점에서 서술해보자.

우선, 앞에서 서술한 바와 같이 전파손실을 갖는(전파흡수를 일으킴) 재료의

유전율과 투자율은 복소수로 표시되고 그 복소비유전율은  $\epsilon_r$ , 복소비투자율은  $\mu_r$ 은 각각 다음 식으로 표현된다.

$$\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' \quad (2.1)$$

$$\mu_r = \mu_r' - j\mu_r'' \quad (2.2)$$

여기서, 허수부는 전파 손실 허용을 나타내고 다음과 같이 그 양자가 모두 0이면 무손실 재료이다.

$$\epsilon_r'' = \mu_r'' = 0 \quad (2.3)$$

따라서  $\epsilon_r''$ 과  $\mu_r''$  중에 적어도 한편이 0이 아닌 것이 전파흡수를 일으키는 것이 된다.

자성 전파흡수재료란 가해진 자계에 의해 전파흡수가 일어나는 것이다. 따라서 복소투자율의 허수부  $\mu_r''$ 이 0이 아닌 것이 자성 전파흡수재료이다. 이때 복소비유전율의 허수부  $\epsilon_r''$ 은 0이든 0이 아니든 상관없다. 즉, 자성손실과 함께 도전손실 혹은 유전손실을 갖는 재료도 있다. 또 복소비유전율의 실수부가  $\mu_r' \neq 1$ 인 것은 자성체라 부르고 있고, 그 중에서  $\mu_r'' = 0$ 이 되면 무손실 자성체이다.

다음에 도전성 전파흡수재료와 유전성 전파흡수재료는 모두  $\mu_r' = 0$ ,  $\mu_r'' = 0$ 이다. 여기서, 이 2개의 차이를 설명하면 다음과 같이 된다.

우선, 전기적 재료정수에는 직류회로를 취급할 때 잘 사용되는 저항을  $\rho$ 가 있다. 이 저항률  $\rho$ 는 도전전류 흐름의 어려움을 나타내는 정수로 직류회로에 있어서 옴 법칙의 정수이다. 그러나 높은 주파수에 있어서도 도전전류만 흐르는 것으로 가정하면, 복소유전율의 허수부  $\epsilon_r''$ 은 저항률  $\rho$  혹은 도전율  $\chi$ 을 이용해 다음 식으로 표현된다.

$$\varepsilon_r'' = \frac{1}{\omega\varepsilon_0\rho} = \frac{\chi}{\omega\varepsilon_0} \quad (2.4)$$

여기서,  $\varepsilon_0$ 는 진공의 유전율로  $\varepsilon_0 = 8.85418782 \times 10^{-12}$  [F/m],  $\omega$ 는 각주파수 ( $\omega = 2\pi f$ )이다. 그래서 사용하는 전파의 주파수에 있어서도 이 식을 만족하는 재료 혹은 근사적으로 이 식에 가까운 재료를 도전성 전파흡수재료라 말한다.

이것에 대해 유전체에 손실분말 등을 혼합한 재료는 식 (2.4)를 만족하지 않는다. 그 이유는 혼합매체에서는 저항체가 유전체 중에 분산된 형으로 되기 때문에 그 등가회로는 복잡하게 된다고 예상된다. 따라서 직류에서는 전류가 거의 흐르지 않기 때문에 저항율  $\rho$ 는 매우 크지만 높은 주파수로 되면 정전용량에 전류가 흐르기 때문에 저항에도 전류가 흘러 전파손실이 크게 나타난다. 그 때문에 직류의 저항률을 사용해 구한 식 (2.4)에 나타난 관계는 이와 같은 매질에서는 만족하지 않는다. 이와 같이 식 (2.4)을 만족시키지 않는 재료를 유전성 전파흡수재료라 부르는 것이다.

## 2.3 전파흡수체의 종류

### (1) 층수에 의한 분류

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

#### ① 단층형 전파흡수체

전파흡수재료가 한 장의 층으로 되어 있고, 보통 이면에는 알루미늄이나 철판 등의 금속이 붙어 있다. 저항피막에 의한  $\lambda/4$ 형 전파흡수체나, 유전성 전파흡수재료에 의한 단층형 전파흡수체는 일반적으로 주파수 대역폭이 좁은 협대

역형 전파흡수특성을 나타낸다. 단 자성전파흡수체인 페라이트 타일은 비교적 넓은 주파수특성을 나타내는 것이 특징이다.

## ② 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.

## ③ 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.

## (2) 외관에 의한 분류

전파흡수체를 외관에 의해 분류하면 다음과 같다.

### ① 평판형 전파흡수체

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

## ② 산형 전파흡수체

흡수체의 형상에 있어 최전면이 전파흡수재료에 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 고아대역 특성이 얻어지는 특징이 있다.

## ③ 피라밋형 전파흡수체

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

## (3) 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.

### ① 협대역형 전파흡수체

주파수 비대역폭  $\Delta f/f_0$ 가 약 10 %정도 이하, 또는 경우에 따라서 20 % 이하의 전파흡수율을 협대역형 전파흡수체라 한다. 레이더 주파수용 등 사용주파수 대역폭이 좁은 경우에 이용된다. 이 협대역형 전파흡수체의 주파수 특성은 단봉특성을 나타내고, 주로 단층형 전파흡수체로 충분하다.

## ② 광대역형 전파흡수체

사용주파수가 넓은 전파흡수체를 광대역형 전파흡수체라 한다. 협대역형과 구별은 명확하지 않으나 비대역폭( $\Delta f/f_0$ )이 20 %이상 또는 30 %이상의 것이다. 이 광대역형 전파흡수체를 얻기 위해 2층형 구조로 하기도 한다. 또 소결 페라이트 타일 등의 단층형 전파흡수체도 이 광대역형이다.

## ③ 초광대역형 전파흡수체

어느 하한 주파수  $f_L$ 이상의 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.

## (4) 용도에 따른 분류

### ① 전파 장애방지 대책용 전파흡수체

고층 건축물에 의한 텔레비전 고스트(ghost) 문제는 사회적 문제까지 되고 있다. 그 대책으로서 안테나의 지향성을 개선하거나 TV 수상기내에서 소거하는 방법, 또는 SHF대에 의한 재방송 등이 있지만, 결정적인 것이 없는 것이 현실이다. 이들 방법 중에서 건축물의 벽면에 전파흡수체를 붙여 반사파를 작게 하는 방법은 장애를 일으키고 있는 원인을 직접 없앤다는 의미에서 뛰어난 대책법이며, 이미 각 방면에서 실용화되어 있다.

- 페라이트계 전파흡수체
- 저항섬유계 전파흡수체

- 저항피막계 밀리미터파 전파흡수체

## ② 레이더 허상방지 대책용 전파흡수체

레이더 허상(false echo)으로서는, 특히 선박의 마스트나 교량으로부터의 반사에 의한 문제를 들 수 있다. 최근에 대형교량이 해상에 건설이 되면서 이것에 의한 선박용 X-band 레이더(주파수 9.375 GHz)의 전파 반사에 기인한 레이더 허상의 문제가 생기고 있다. 교량으로부터의 반사 전파 때문에 선박이 없는 위치 내 허상이 나타나거나 위상관계에 따라서는 선박의 상이 잘 보이지 않게 되는 것으로 경우에 따라서는 사고의 원인이 된다.

- 고무-페라이트계 전파흡수체
- 고무-카본계 전파흡수체
- 금속섬유, 페라이트 다층형 전파흡수체

## ③ 전파암실용 전파흡수체

전파암실은 실내의 벽면에 전파흡수체를 붙인 방으로 내부에서 발생된 전파는 벽면에서 흡수되어 반사파가 생기지 않으므로 전파적으로 보면 무한 공간과 등가가 된다. 따라서 종래부터 안테나의 지향성 실험 등의 목적을 위해서 건설되어 왔다. 더욱이 최근의 전자파 환경문제를 위해 각종 전자기기로부터의 방사전자파 평가시험을 위한 전파암실이나 밀리미터파대의 연구개발에 맞추어 그 사양이 밀리미터파 대까지 가능한 전파암실이 시공되고 있다.

- 페라이트-카본계 다층형 전파흡수체
- 카본계 피라미드형 전파흡수체
- 페라이트-저항필름 다층형 판상재 전파흡수체

#### ④ 밀리미터파대용 전파흡수체

최근 레이더나 통신기 등의 사용 주파수도 밀리미터파대의 높은 영역으로 옮겨가고 있으며 그에 따라 밀리미터파 대에 대한 전파흡수체의 필요성도 높아져 가고 있다. 이러한 배경에서 밀리미터파 전파흡수체의 연구도 활발해져서 35 GHz대나 60 GHz대 나아가서는 94 GHz대용 고무시트계 흡수체나 저항피막형 전파흡수체의 연구가 진행되고 있다. 한 예로서 사무실이나 공장 등의 실내에서의 밀리미터파를 이용한 무선 LAN의 경우 밀리미터파 전파흡수체를 천정이나 바닥의 벽면에 장착하여 전파가 이들로부터 다중 반사하는 것을 막아 정보전달의 오류율(error rate)을 적게 하고 있다. 나아가서 최근 전자파의 인체에 대한 영향에 관해서는 우려하는 목소리가 높아지고 있다. 이러한 배경에서 인체의 전파흡수율(SAR ; Specific Absorption Rate)을 규명하는 연구가 행해지고 있으며, 이러한 분야에 있어서도 전파흡수체의 역할은 중요해져 있다.

### 2.4 전파흡수체에 요구되는 특성

전파흡수체는 그 반사계수를 작게 하는 것이 절대조건이지만 투과량도 적게 하지 않으면 안 된다. 이 때문에, 만약 전파흡수체 표면에 다른 반사물체가 있다면 그것에서 반사파가 다시 전파흡수체를 역방향으로 투과해 앞면으로 되 돌아온다. 이러한 현상은 전파흡수체에 의해 반사파를 없앤 것이 아니고 전파흡수체에서 전파가 되 돌아 온 것과 같다. 그래서 일반적으로 전파흡수체의 표면에 얇은 금속판을 접착해 투과파를 없애고 있으며, 그 값의 크기에 대해서는 그다지 논란이 없다.

이와 같이, 전파흡수체에서는 반사계수와 투과량 양측을 작게 하지 않으면 안 되는 것과 입사한 전파에너지 전부를 흡수하지 않으면 안 되기 때문에 전파흡수체의 두께는 두껍게 된다. 특히 넓은 주파수 특성을 갖기 위해서는 적어도 파장의 10분의 1 오더(order)이하의 두께가 된다.

전파흡수체에 요구되는 특성에는 여러 가지가 있지만, 특히 반사계수의

크기, 입사전파의 방향이나 편파특성, 주파수 특성, 두께 등이 중요하다. 이들은 사용목적에 따라 다르지만 단층구조에서는 충분한 특성이 얻어지지 않기 때문에 보다 나은 특성을 달성하기 위해 다층구조로 하는 것이 많다.

다음은 일반적으로 전파흡수체에 요구되는 특성을 간단히 설명한 것이다.

#### (1) 사용주파수가 높을 것

모든 주파수에 대해 허용반사계수 이하로 하는 것은 불가능하므로 필연적으로 사용주파수가 한정된다. 그래서 가능한 한 사용주파수가 넓은 것이 좋다. 단, 주파수에 따라서 대역폭이 다르므로 주파수의 관점에서 본 전파흡수체의 모양은 사용주파수폭  $\Delta f$ 을 중심주파수  $f_0$ 로 나눈 주파수 비대역폭  $\Delta f/f_0$ 으로 나타낸다.

#### (2) 전파흡수체의 두께가 얇을 것

전파흡수체의 두께가 얇은 것이 좋다. 현재 가장 얇은 것으로 헵대역형으로 0.64 mm로 약 10 GHz에 대해서 반사계수 -20 dB인 것으로 실리콘 내에 자성체를 혼입한 유연한 쉬트이다.

#### (3) 편파특성이 뛰어날 것

전파흡수체에 전파가 사입사하는 경우는 TE파와 TM파를 고려하지 않으면 안된다. TV전파의 경우와 같이 편파가 결정되는 경우에는 그 편파에 대한 전파흡수체를 만들면 되나 전파무향실의 경우와 같이 모든 방향으로부터 임의의 편파인 전파가 도래하는 경우에는 각 편파에 대해서 사입사 특성도 양호한 전파흡수체를 만들어야 한다.

#### (4) 가벼울 것

전파흡수체는 전파무향실의 벽이나 천정에 사용하거나 고층건물이 벽면

이나 대형 교량의 금속부재에 붙이므로 가능한 가벼운 것이 좋다. 하지만 박형화된 슈트형 전파흡수체의 경우는 이점을 고려하지 않아도 될 듯하다.

#### (5) 강도가 있을 것

전파흡수체 표면에는 어떤 물체가 충돌할 수도 있으므로 표면강도가 어느 정도 크지 않으면 안된다.

#### (6) 내후성(耐朽性)이 뛰어날 것

전파흡수체는 실내에서 사용하는 외에 실외에서도 많이 사용되기 때문에 장기간의 내환경특성이 뛰어난 전파흡수체가 요구된다.

## 2.5 전파흡수체의 해석 이론

### 2.5.1 단층형 전파흡수체의 해석 이론

그림 2.1에 나타내는 바와 같이 자유공간을 전파하는 평면파가 전파흡수체에 수직 입사하는 경우를 생각한다. 전파흡수체의 후면에는 반사판으로서의 역할을 하는 금속판이 붙여져 있다. 이와 같이 종단에  $Z_l$ 의 부하를 접속한 특성 임피던스  $Z_c$ 의 분포정수선로에 있어서, 종단으로부터 거리  $d$ 의 위치에 있는 점으로부터 종단 축을 들여다 본 입력임피던스는  $Z_m$ 은 전파정수를  $\gamma_c$ 라 하면,

$$Z_m = Z_c \frac{Z_l + Z_c \tanh \gamma_c d}{Z_c + Z_l \tanh \gamma_c d} \quad (2.5)$$

가 된다. 여기서, 전파흡수체의 특성임피던스  $Z_c$  및 전파정수  $\gamma_c$ 는 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z_c = Z_o \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \quad (2.6)$$

$$\gamma_c = j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad (2.7)$$

더욱이, 그림 2.1의 해석모델에서  $Z_l$ 은 금속판의 특성 임피던스가 되므로  $Z_l=0$ 이 되어 식 (2.5)는 다음과 같이 고쳐 쓸 수 있다.

$$Z_{in} = Z_c \tanh \gamma d \quad (2.8)$$

여기서 식 (2.6) 및 (2.7)을 식 (2.8)에 대입하면 식 (2.9)는 다음과 같이 고쳐 쓸 수 있다.

$$Z_{in} = Z_o \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tanh\left(j \frac{2\pi d}{\lambda} \sqrt{\epsilon_r \mu_r}\right) \quad (2.9)$$

그리고 식 (2.9)를  $Z_o$ 와의 비율로 정규화 하면 식 (2.10)과 같다.

$$\hat{z}_{in} = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tanh\left(j \frac{2\pi d}{\lambda} \sqrt{\epsilon_r \mu_r}\right) \quad (2.10)$$

여기서  $\epsilon_r$ 은 복소비유전율,  $\mu_r$ 은 복소비투자율이다. 그리고 입사한 전자파의 완전흡수조건은  $\hat{z}_{in}=1$ 이 되고, 반사계수와 감쇠량은 식 (2.11)과 (2.12)와 같다.

$$\Gamma = S_{11} = \frac{\hat{z}_{in} - 1}{\hat{z}_{in} + 1} \quad (2.11)$$

$$\alpha = -20 \log |S_{11}| \text{ [dB]} \quad (2.12)$$

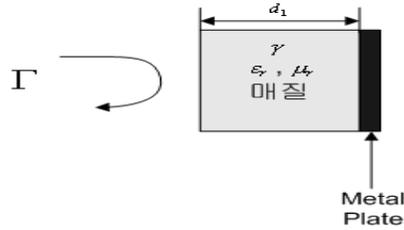


그림 2.1 단층형 전파흡수체

Fig. 2.1 Single-layer EM wave absorbers.

### 2.5.2 적층형 전파흡수체의 해석 이론

전파흡수체의 주파수특성을 광대역화하기 위하여 그림 2.2와 같이 전파흡수체 뒤에 금속판을 부착하고 그 전면에  $n$ 개의 손실재료 층을 두어 다층구조로 하는 방법을 생각할 수 있다.

입사전파의 표면반사를 줄이기 위하여 전파흡수체 표면에서의 특성임피던스를 자유공간의 파동임피던스  $Z_0$ 와 거의 같도록 할 필요가 있는데,  $Z_0$ 에 가까운 재료는 전파에 대한 감쇠정수가 작기 때문에 흡수효과가 적어서 전파흡수체의 두께는 두껍게 되며, 감쇠정수가 큰 재료( $\epsilon_r''$  또는  $\mu_r''$ 이 큰 재료)를 이용하면 흡수체 재료 내부로 투과하는 전자파가 빨리 감쇠하기 때문에 전파흡수체의 두께는 얇게 할 수는 있으나 전파흡수체 표면의 임피던스가 달라 큰 반사가 생겨 고성능 전파흡수체로서의 기능은 기대할 수 없게 된다.

여기서 전파흡수체를 다층구조로 하여 표면에 가까운 재료는 공기와 가까운 특성을 가지게 하고, 도체판으로 갈수록 전파흡수가 큰 재료를 적층하면 흡수체 표면에서의 반사가 적어지고 또 각층 경계면에 의한 반사도 적어 전자파는 서서히 손실이 큰 전파흡수 재료로 들어가 흡수된다. 이렇게 각층의 재료정수는 연속적으로 변화시킴으로써 주파수 특성을 보다 광대역화 할 수 있다. 이렇게 전파흡수체를 다층구조로 하면 입사하는 주파수가 다소 변화하더라도 같은 정도로 전파를 흡수하므로 다층구조에 의하여 전파흡수체 특성을 광대역으로 할 수 있다.

그림 2.2와 같은 다층형 전파흡수체에서 임의의 층인 제  $i$ 층의 복소비유전율을  $\epsilon_{ri} = \epsilon'_{ri} - j\epsilon''_{ri}$ 이라 하고, 복소비투자율  $\mu_{ri} = \mu'_{ri} - j\mu''_{ri}$ , 흡수체 두께를  $d_i$ 이라고 하면, 평면파가 전파흡수체의 제  $i$ 층에 수직으로 입사할 때 제  $i$ 층의 정규화임피던스  $Z_{ci}$ 와 전파정수  $\gamma_i$ 은 각각 다음과 같다.

$$Z_{ci} = \sqrt{\frac{\mu_{ri}}{\epsilon_{ri}}} \quad (2.13)$$

$$\gamma_i = jw \sqrt{\mu_i \epsilon_i} \quad (2.14)$$

$n$ 층의 전파흡수체의 표면에서의 전체적인 반사계수를 구하기 위하여 전파흡수체 배면으로부터 순서적으로 입력임피던스를 구한다. 금속판에 가장 가까운 층을 제 1층, 표면 쪽으로 각각 제 2층, 제 3층,....., 표면에 가장 가까운 층을 제  $n$ 층이라 하면, 제1층의 배면에 있는 금속판의 임피던스는 0이다. 1층과 2층의 경계면에서 금속판 쪽을 들여다 본 규격화 입력임피던스  $z_1$ 은 단층형 전파흡수체의 경우와 같으므로

$$z_1 = z_{c1} \tanh \gamma_1 d_1 \quad (2.15)$$

이다. 다음으로 제  $i$ 층에서의 입력임피던스는

$$z_i = z_{ci} \frac{z_{i-1} + z_{ci} \tanh \gamma_i d_i}{z_{ci} + z_{i-1} \tanh \gamma_i d_i} \quad (2.16)$$

마찬가지 방법으로 제  $n$ 층에서 입력임피던스  $z_n$ 은

$$z_n = z_{cn} \frac{z_{n-1} + z_{cn} \tanh \gamma_n d_n}{z_{cn} + z_{n-1} \tanh \gamma_n d_n} \quad (2.17)$$

이 된다. 여기서  $n = 1, 2, 3, \dots$ ,이다.

식 (2.17)에 식 (2.13), (2.14)를 적용하면 다음 식이 얻어진다.

$$z_n = \sqrt{\frac{\mu_{rn}}{\epsilon_{rn}}} \frac{z_{n-1} + \sqrt{\frac{\mu_{rn}}{\epsilon_{rn}}} \tanh(j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\mu_{rn}\epsilon_{rn}} d_n)}{\sqrt{\frac{\mu_{rn}}{\epsilon_{rn}}} + z_{n-1} \tanh(j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\mu_{rn}\epsilon_{rn}} d_n)} \quad (2.18)$$

따라서, 이 전파흡수체 전면에서의 반사계수  $\Gamma_n$ 은

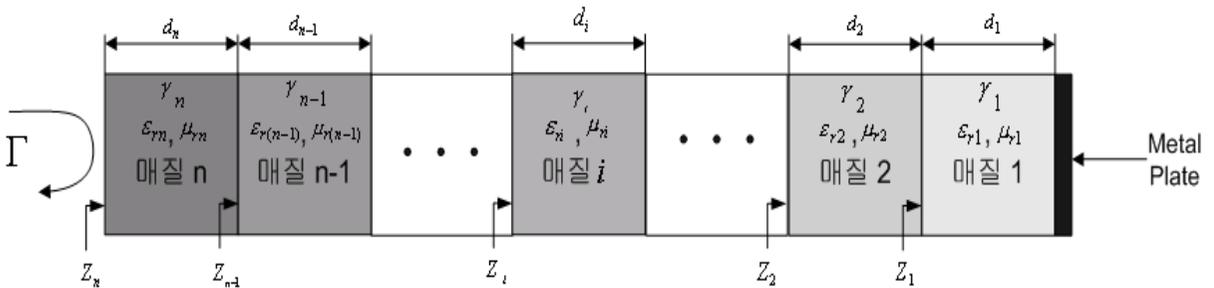
$$\Gamma_n = \frac{z_n - 1}{z_n + 1} \quad (2.19)$$

이 되므로 허용반사계수를  $|\Gamma_0|$ 라 하면

$$\Gamma_n = \frac{z_n - 1}{z_n + 1} \leq |\Gamma_0| \quad (2.20)$$

의 조건에서 전파흡수체의 전체 두께가 최소가 되면서 대역폭이 가장 넓게 되도록 전파흡수체를 설계한다.

이상과 같이 전파흡수체의 흡수대역을 보다 광대역화 하고 변화시키는 방법이 있으며, 공간적으로 기하학적 형상변화에 의하여 재료정수를 연속적으로 변화시키는 방법이 있다.



## 2.2 적층형 전파흡수체

Fig. 2.2 Multi-layer EM wave absorbers.

## 2.6 전파함수체 분포정수회로화

### 2.6.1 파동방정식(Helmholtz Equation)

(1) 단순매질영역의 파동방정식

장(field)을 만드는 전원(source)  $\mathbf{J}$ ,  $\rho$ 의 분포로부터 멀리 떨어져 있는 손실이 없는 단순매질 영역에서 맥스웰 방정식은

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.21)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2.22)$$

여기서  $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$ 이며  $\sigma$ 는 매질의 손실을 나타내는 도전율이다.

전원분포가 없는 무손실 단순매질이라면  $\sigma = 0$ 이므로 식 (2.21) 양변에 회전을 취하여 식 (2.22)를 대입하여 정리하면

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (2.23)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (2.24)$$

로 전계와 자계에 관한 파동방정식(Helmholtz equation)을 얻을 수 있다.

시간적 변화가  $e^{j\omega t}$ 인 시변장에서 매질의 전파정수(propagation constant)인 파수벡터  $\gamma$ 를 도입하여  $\omega^2 \mu \varepsilon = \gamma^2$ 로 놓으면 전계와 자계에 관한 파동방정식(Helmholtz equation)은

$$\nabla^2 \mathbf{E} + \omega^2 \mu \varepsilon \mathbf{E} = \nabla^2 \mathbf{E} + \gamma^2 \mathbf{E} = 0 \quad (2.25)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} + \omega^2 \mu \varepsilon \mathbf{H} = \nabla^2 \mathbf{H} + \gamma^2 \mathbf{H} = 0 \quad (2.26)$$

로 된다. 식 (2.25)와 식 (2.26)은 동일한 형태의 방정식이므로 전계와 자계는 같은 형식의 해를 갖게 된다. 또한 식 (2.21)~식 (2.26)에서 회전으로 인한 성분은 다음과 같고  $z$  방향 성분은 존재하지 않는다.

$$\frac{\partial E_y}{\partial z} = j\omega\mu H_x \quad (2.27)$$

$$\frac{\partial H_x}{\partial z} = j\omega\varepsilon E_y \quad (2.28)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial z} = -j\omega\mu H_y \quad (2.29)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial z} = -j\omega\varepsilon E_x \quad (2.30)$$

식 (2.27)~식 (2.30)을 고려하면 식 (2.25)와 식 (2.26)은 다음과 같은 평면파의 파동방정식으로 되어

$$\nabla^2 E_x + \gamma^2 E_x = 0 \quad (2.31)$$

$$\nabla^2 H_y + \gamma^2 H_y = 0 \quad (2.32)$$

장(field)을 만드는 전원(source)  $\mathbf{J}$ ,  $\rho$ 의 분포가 없을 때 평면파에서 전자파가 진행해 나갈 때의 파동을 나타낸다. 식 (2.31)과 식 (2.32)의 해를 지수함수 형태로 나타내면 다음과 같이 된다.

$$E_x = E^+ e^{-\gamma z} + E^- + e^{\gamma z} \quad (2.33)$$

$$H_y = \frac{1}{Z_c} (E^+ e^{-\gamma z} - E^- + e^{\gamma z}) \quad (2.34)$$

이것은 파수벡터  $\boldsymbol{\gamma}$ 가  $\mathbf{H}$ 에 직교할 뿐 아니라  $\mathbf{E}$ 에도 직교하는 것을 나타내고 또한 포인팅 벡터를 구해보면 파수벡터  $\boldsymbol{\gamma}$  방향으로 방사전력이 나가는

것을 의미한다. 전파흡수체에서는 이러한 방사전력이 반사 없이 흡수되어야 함을 전제로 한다.

평면파에서 방사전력 총량은  $Re(s)$  에 수직한 전 평면에 걸쳐 적분함으로서 구할 수 있겠으나 무한평면이므로 방사전력의 총량도 무한대로 되어 실제적으로 평면파는 물리적으로 실현할 수 없는 파동이 된다. 미소 전류원에 의한 파동방정식의 해에 주목해보면 구면파는  $r^{-1}e^{-jkr}$  의 인자를 가지는데 포인팅 벡터로 방사전력총량을 구하면 유한치가 된다. 거리가 매우 큰 곳에서는 거리를 조금 변화시켜도 거리의 변화율은 극히 적다. 이것에 대하여  $e^{-jkr}$  항은 거리의 미소 변화에도 민감하게 변한다. 따라서 전류원으로부터 멀리 떨어진 곳에서의 구면파를 부분적으로 조사 할 때는 수식적으로 간단하기 때문에 평면파로 취급할 수 있게 된다.

## (2) 분포정수회로의 파동방정식

다음으로 일반적인 전송선로의 분포정수회로에 대하여 생각해본다. 높은 주파수대역에서 두 개 이상의 도체로 구성된 전송선로(Transmission Line)에서 길이 방향으로 그 특성이 일정한 선로는 특성 Impedance와 전파정수로 정의되며 이러한 선로는 분포정수회로로 해석된다. 여기서  $R$ 은 단위 길이 당 저항성분( $\Omega/m$ )으로 도체의 불완전한 상태를 표시하며,  $L$ 은 단위 길이 당 인덕턴스( $H/m$ ),  $G$ 는 단위길이 당 컨덕턴스 성분( $S/m$ )으로 유전체 손실여부를 의미하며,  $C$ 는 단위길이 당 커패시턴스 성분( $F/m$ )을 의미한다.

그림 2.4의 마디 A B에서 KVL을 적용하고, 마디 B C에서 KCL을 적용하면

$$\frac{\partial v(t, z)}{\partial z} = - \left[ Ri(t, z) + L \frac{\partial i(t, z)}{\partial t} \right] \quad (2.35)$$

$$\frac{\partial i(t, z)}{\partial z} = - \left[ Gv(t, z) + C \frac{\partial v(t, z)}{\partial t} \right] \quad (2.36)$$

여기서  $z$ 는 선로를 진행하는 거리함수이다.

$R=0, G=0$  인 무손실 전송선로(lossless line)에서 식 (2.35)와 식 (2.36)의 폐이저 표현은

$$\frac{dV(z)}{dz} = -(R + j\omega L)I = -Z_s I(z) \quad (2.37)$$

$$\frac{dI(z)}{dz} = -(G + j\omega C)V = -Y_p V(z) \quad (2.38)$$

여기서  $\gamma^2 = Z_s Y_p$ 의 복소전파정수(complex propagation constant)를 도입하면 식(2.37)과 식 (2.38)은

$$\frac{d^2 V(z)}{dz^2} = \gamma^2 V(z) \quad (2.39)$$

$$\frac{d^2 I(z)}{dz^2} = \gamma^2 I(z) \quad (2.40)$$

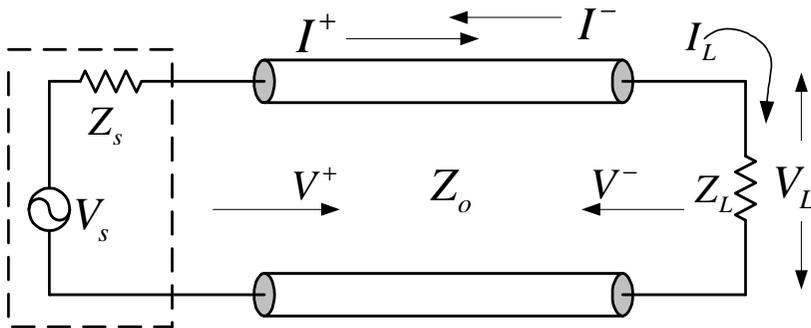


그림 2.3 일반적인 전송선로

Fig. 2.3 General Transmission Line.

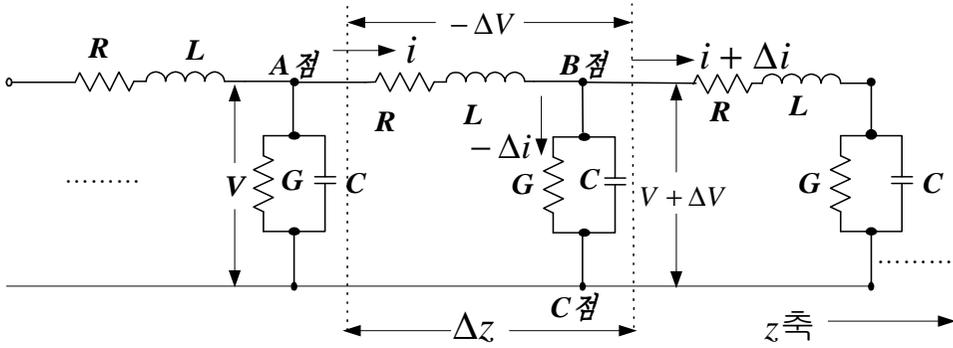


그림 2.4 일반적인 전송선로의 등가회로

Fig. 2.4 Equivalent Circuit of General Transmission Line

가 된다. 식 (2.39)와 식 (2.40)에서 일반적인 2계 미방의 해는 독립된 두개의 항을 가지므로 부하임피던스  $Z_L$  을 전파함수체의 특성임피던스  $Z_C$  로 하면

$$V(z) = V_i e^{-\gamma z} + V_r e^{+\gamma z} = V^+ + V^- \quad (2.41)$$

$$I(z) = \frac{1}{Z_C} (V_i e^{-\gamma z} - V_r e^{+\gamma z}) = \frac{1}{Z_C} (V^+ - V^-) \quad (2.42)$$

로 되어 평면파에서 식 (2.41)과 식 (2.42)와 같은 형태가 된다.

### 2.6.2 분포정수회로화

먼저 식 (2.29)와 식 (2.30) 및 식 (2.37)과 식 (2.38)에서

$$\mu = \mu' - j\mu'' \quad (2.43)$$

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (2.44)$$

로 놓고  $R=0, G=0$  인 무손실 전송선로(lossless transmission line)에서 분

포정수회로의 기본식을 표현하면

$$\frac{dE_x}{dz} = -j\omega(\mu' - j\mu'')H_y = (-\omega\mu'' - j\omega\mu')H_y = -(\omega\mu'' + j\omega\mu')H_y \quad (2.45)$$

$$\frac{dH_y}{dz} = -j\omega(\varepsilon' - j\varepsilon'')E_x = (-j\omega\varepsilon' - \omega\varepsilon'')E_x = -(\omega\varepsilon'' + j\omega\varepsilon')E_x \quad (2.46)$$

$$\frac{dV(z)}{dz} = -(R + j\omega L)I = -Z_s I(z) \quad (2.47)$$

$$\frac{dI(z)}{dz} = -(G + j\omega C)V = -Y_p V(z) \quad (2.48)$$

이 되어 식 (2.45)~식 (2.48)을 비교하면 같은 형태의 식으로 대응한다.

따라서 다음 파라미터를 치환하여도 양자는 일치됨을 알 수 있다. 즉, 분포정수회로에서의  $V$ ,  $I$ 는 개념적으로  $E_x$ ,  $H_x$ 에 대응하며 마찬가지로 분포정수회로의  $L$ ,  $C$ ,  $R$ ,  $G$ 는 전자장에서  $\mu'$ ,  $\varepsilon'$ ,  $\omega\mu''$ ,  $\omega\varepsilon''$ 에 대응하게 된다.

이것을 정리하면

$$L \leftrightarrow \mu', \quad C \leftrightarrow \varepsilon', \quad R \leftrightarrow \omega\mu'', \quad G \leftrightarrow \omega\varepsilon'' \quad (2.49)$$

으로 되고, 이러한 대응관계를 분포정수회로의 전파정수에 적용하면

$$\begin{aligned} \gamma &= \sqrt{ZY} = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \\ &= \sqrt{(\omega\mu'' + j\omega\mu')(\omega\varepsilon'' + j\omega\varepsilon')} = j\omega\sqrt{\varepsilon\mu} \end{aligned} \quad (2.50)$$

이 되며, 또한 선로 특성임피던스는

$$\begin{aligned} Z_C &= \sqrt{\frac{Z_S}{Y_P}} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} = \sqrt{\frac{(\omega\mu'' + j\omega\mu')}{(\omega\varepsilon'' + j\omega\varepsilon')}} = \sqrt{\frac{\mu' - j\mu''}{\varepsilon' - j\varepsilon''}} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \\ Z_C &= \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} = \sqrt{\frac{\mu_0\mu_r}{\varepsilon_0\varepsilon_r}} \end{aligned} \quad (2.51)$$

가 되어 분포정수회로에서의 특성임피던스  $Z_C$ 는 Electromagnetic Fields 에서의 파동임피던스와 쌍대 관계에 있음을 알 수 있다.

또한 공기 중에서의  $\epsilon', \mu'$  의 값은 1이고  $\epsilon'', \mu''$  의 값은 0이므로

$$\epsilon = \epsilon_o \epsilon_r = \epsilon_o (\epsilon' - j\epsilon'') = \epsilon_o \quad (2.52)$$

$$\mu = \mu_o \mu_r = \mu_o (\mu' - j\mu'') = \mu_o \quad (2.53)$$

가 된다. 따라서 자유공간(free space)에서의 파동임피던스와 전파정수는 다음과 같이 표현된다.

$$Z_O = \sqrt{\frac{\mu_o}{\epsilon_o}} = 120\pi \cong 377\Omega \quad (2.54)$$

식 (2.51)을 식 (2.54)로 정규화(normalized)시키면

$$z_c = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \quad (2.55)$$

로 소문자로 나타내기로 한다. 또한 진공중과 임의의 매질에서 전파정수는 각각

$$\gamma_o = j\beta_o = j\omega \sqrt{\epsilon_o \mu_o} \quad (2.56)$$

$$\gamma = \sqrt{ZY} = \sqrt{(R+j\omega L)(G+j\omega C)} = \sqrt{\omega\mu'' + j\omega\mu'}(\omega\epsilon'' + j\omega\epsilon') \quad (2.57)$$

$$= \sqrt{j\omega(\mu' - j\mu'')j\omega(\epsilon' - j\epsilon'')} = j\omega \sqrt{(\mu' - j\mu'')(\epsilon' - j\epsilon'')}$$

$$= j\omega \sqrt{\epsilon\mu} = j2\pi f \sqrt{\epsilon\mu} = j2\pi \frac{\sqrt{\epsilon\mu}}{\lambda \sqrt{\epsilon_o \mu_o}} = j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$$

로 되어 분포정수회로 상의 파라미터  $R, L, C, G$ 를 전자장 Parameter로 변

환시킬 수 있다.

전기회로 내에서 전력을 소비하는 역할을 하는 것은 저항  $R$ 과 컨덕턴스  $G$ 이다. 유전율  $\varepsilon (= \varepsilon' - j \varepsilon'')$  과 투자율  $\mu (= \mu' - j \mu'')$  에 주목하여 보면  $R$ 과  $G$ 에 대응하는 것은 각각의 복소성분  $\mu''$ 과  $\varepsilon''$ 로서  $L$ 과  $C$ 는 무효손실이며  $R$ 과  $G$ 는 유효손실이 된다. 이것은 회로이론에서 무효전력과 유효전력의 벡터 합이 피상전력이 되는 것으로 이해 할 수 있다. 많은 전파흡수체는 도체 금속판의 앞에 적당한 얇은 재료를 한 장 또는 여러 장을 배치하여 실현시킨다. 전자파의 입사 방향에서 보면 공기층과 전파흡수체 층으로 놓여진 것으로 된다. 여기에 사용된 재료정수는 투자율  $\mu$ 와 유전율  $\varepsilon$ 을 가지고 있다. 이들 재료정수를 식 (2.49)에 적용하면 분포정수회로화 할 수 있다.

식 (2.41)과 식 (2.42)에서  $V_i e^{-\gamma z}$ ,  $V_r e^{\gamma z}$ 는 각각 전원에서 부하방향 및 부하에서 전원방향으로 진행되는 파로서 부하 측에서 보면, 전자는 입사파, 후자는 반사파가 된다. 반사파는 전자파가 진행되는 매질의 임피던스와 부하 임피던스의 부정합에 의한 것으로 이 부분을 정합시킴으로서 반사파 성분을 제거 할 수 있고 전파흡수체 경우 전자파가 진행되는 매질의 임피던스와 흡수체의 임피던스를 정합 시킨 것이라 할 수 있다.

식 (2.41)과 식 (2.42)를 쌍곡선함수로 표현하여 분포정수회로 임의의 점  $d$ 에서 임피던스는

$$Z(d) = \frac{V(d)}{I(d)} = Z_c \frac{Z_L + Z_c \tanh \gamma d}{Z_c + Z_L \tanh \gamma d} \quad (2.58)$$

가 된다.

그림 2.5와 같은 전파흡수체 구조에서 흡수체 경계면에서 부하로 들여다보는 입력임피던스는 부하가 도체판으로 단락 되어 있으므로  $Z_L = 0$ 에서

$$Z_{in} = Z_c \tanh \gamma d \quad (2.59)$$

가 된다. 여기서  $d$ 는 전파흡수체의 두께에 해당되며  $Z_c$ 는 전파흡수체 특

성임피던스이다. 따라서 식 (2.57)에 식 (2.50), (2.51)을 적용하면 수전단에서 두께  $d$ 떨어진 흡수체 표면에서의 임피던스는

$$Z_{in} = Z_C \tanh \gamma d = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \tanh(j\omega \sqrt{\epsilon\mu}) d \quad (2.60)$$

정규화(normalized)시키면

$$z_{in} = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tanh(j\omega \sqrt{\epsilon_r \mu_r}) d \quad (2.61)$$

이 된다.

이것은 전파흡수체 부분을 전송선로의 일부로 취급하여 계산한 경우이므로 전파흡수체의 표면에서 반사파가 일어나지 않기 위해서는 흡수체 표면에서의 입력 임피던스  $Z_{in}$ 과 진공중의 파동임피던스  $Z_0$ 와 같아야 함을 알 수 있다.

식 (2.41)~(2.42)로부터 전압과 전류 반사계수(reflection coefficient)는

$$\Gamma_V(z) = \frac{V^- e^{-\gamma z}}{V^+ e^{\gamma z}} = \frac{V^-}{V^+} e^{-2\gamma z} \quad (2.62)$$

$$\Gamma_I(z) = \frac{-V^- e^{-\gamma z}/Z_0}{V^+ e^{\gamma z}/Z_0} = -\frac{V^-}{V^+} e^{-2\gamma z} = -\Gamma_V(z) \quad (2.63)$$

로 정의되고  $z=0$ 에서는

$$\Gamma_V(0) = \frac{V^-}{V^+} = \frac{Z_L - 1}{Z_L + 1} \quad (2.64)$$

따라서 임의의 점  $x$ 에서 부하단을 본 임피던스는

$$Z_{in} = \frac{V(x)}{I(x)} = Z_0 \frac{1 + \Gamma(x)}{1 - \Gamma(x)} \quad (2.65)$$

정규화 시키면

$$z_{in} = \frac{Z_{in}(x)}{Z_0} = \frac{1 + \Gamma(x)}{1 - \Gamma(x)} \quad (2.66)$$

또 반사계수를 정규화 임피던스로 나타내면

$$\Gamma(x) = \frac{z_{in} - 1}{z_{in} + 1} \quad (2.67)$$

이 된다. 반사계수  $\Gamma$ 는 0~1까지의 값을 갖는데 전파흡수체에서는  $\Gamma$ 가 적을수록 전파의 흡수능이 뛰어나다고 볼 수 있다. 가령  $\Gamma$ 가 극단적으로 0이면 무반사이므로 전자파 에너지의 완전 흡수가 일어나고  $\Gamma$ 가 1이면 완전반사로 전파흡수는 일어나지 않는다[12].

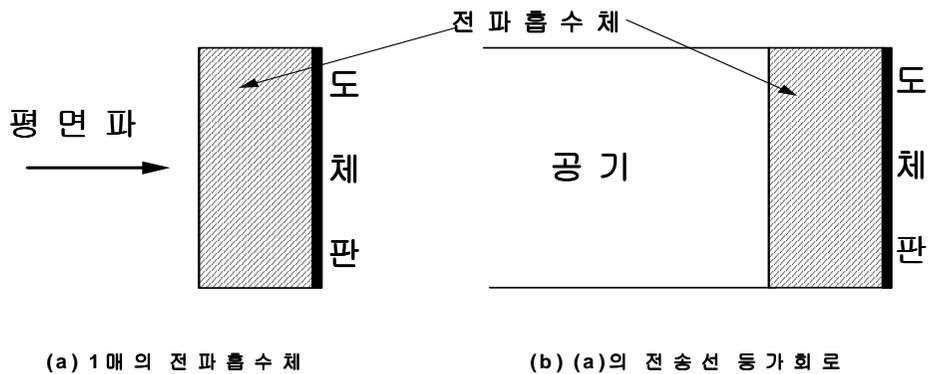
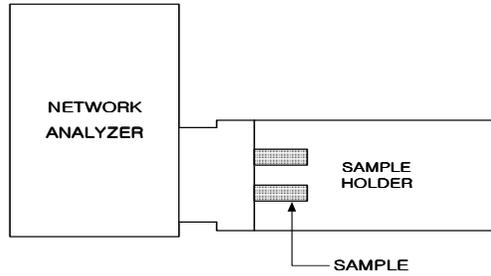


그림 2.5 전파흡수의 기본 구성

Fig. 2.5 Basic Composition of Electromagnetic Wave Absorber.

## 2.7 전파흡수체의 반사계수 측정 방법

본 논문에서 제작된 Sheet형 전파흡수체 반사계수를 측정하는데 사용되는 장비는 다음과 같다. 반사계수 측정법에 사용되는 장비는 그림 2.6의 Network Analyzer와 그림 2.7의 Sample Holder가 사용된다.



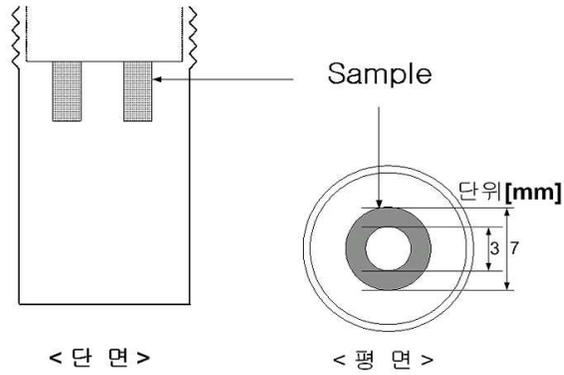
(a) 네트워크 어날라이저의 단면도



(b) 네트워크 어날라이저의 사진

그림 2.6 네트워크 아날라이저의 (a) 단면도, (b) 사진

Fig. 2.6 (a) Cross section and (b) picture of Network Analyzer.



(a) 샘플홀더 단면 · 평면도



(b) 샘플홀더 사진

그림 2.7 Sample Holder (a) 단면 · 평면도, (b) 사진  
 Fig. 2.7 (a) Cross section and (b) picture of Sample Holder.

## 2.8 재료정수 측정법

### 2.8.1 사용된 *Sample Holder*

그림 2.8은 One-Port Method  $\ell-2\ell$ 법을 사용하여 흡수체의 전파흡수능과 재료정수를 측정할 시료의 2 mm, 4 mm Sample 도면이다. 그림 2.9는 시료를 측정할 수 있도록 만들어진 Sample Holder의 단면(a)와 위에서 본 평면(b)의 그림이다. 진하게 칠해져 있는 부분이 Sample이 삽입되는 곳이며 이 Holder는 Network Analyzer(HP:8753D)와의 연결 시 틈이 없는 Flash Holder이다.

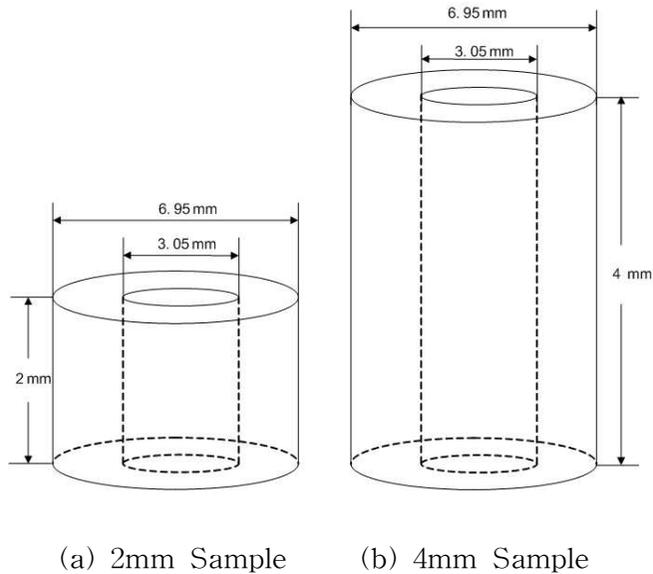
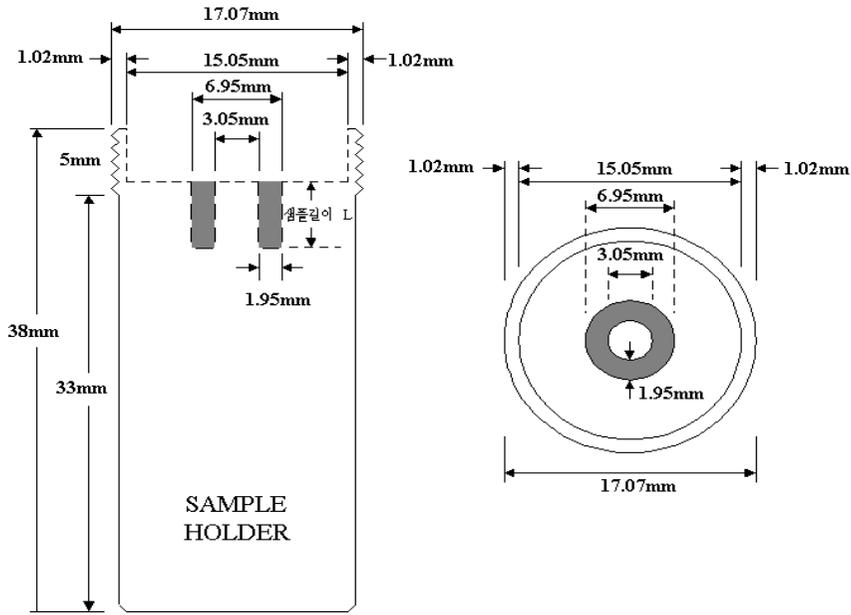


그림 2.8 제작된 Sample 도면 (a) 2mm (b) 4mm

Fig. 2.8 Manufactured sample (a) 2mm and (b) 4mm.



(a) Sample Hplder의 단면

(b) Sample Holder의 평면

그림 2.9 Sample Holder 단면도와 평면도

Fig. 2.9 Cross-section and plane of Sample Holder.

### 2.8.2 재료정수 계산방법

본 논문에서는 전파흡수체 시편의 재료정수는 반사손실 HP(Hewlett Packard) 8753D를 사용하여 측정하였고, 측정된 반사손실을 이용하여 다음과 같은 방법으로 계산하였다.

우선, Flash Holder를 Sample Holder로 사용하고 그림 2.10에서 보는 것과 같이 Network Analyzer의 Port와 Sample Holder 사이에 틈이 없이 밀착시키면 반사계수  $S_{11}(\ell)$ 은 전체에 대한 반사계수와 같게 된다.

그러므로 Short Sample의 측정치로 전체 반사계수를 측정할 필요 없이 Sample 길이가  $\ell$  일 때와  $2\ell$  일 때의 임피던스만 계산하면 된다.

우선 그림 2.10 과 같이 Sample 길이가  $\ell$  일 때의 임피던스는

$$Z(\ell) = \frac{1 + S_{11}(\ell)}{1 - S_{11}(\ell)} \quad (2.68)$$

와 같이 구해진다.

그림 2.11과 같이 Sample 길이가  $2\ell$  일 때의 반사계수  $S_{11}(2\ell)$ 은 전체의 반사계수  $S_{11}(\ell)$ 과 같게 된다. 그러므로  $2\ell$  일 때의 임피던스 식 (2.69)과 같다.

$$Z(2\ell) = \frac{1 + S_{11}(2\ell)}{1 - S_{11}(2\ell)} \quad (2.69)$$

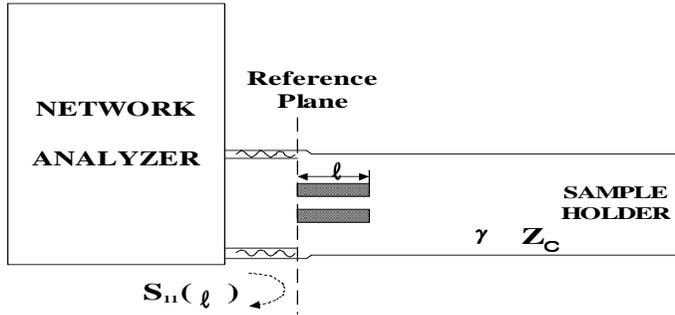


그림 2.10 샘플의 길이가  $l$ 인 Flash Holder  
Fig. 2.10 Flash Holder with sample length  $l$ .

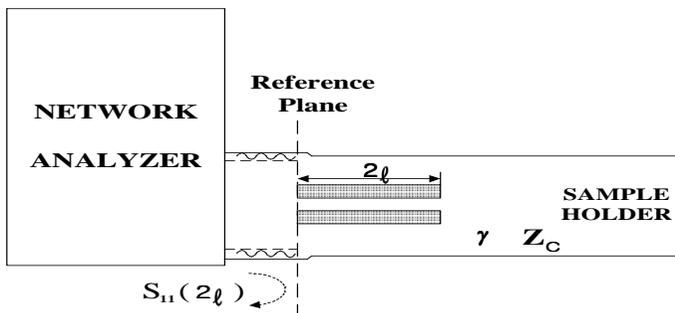


그림 2.11 샘플의 길이가  $2\ell$  인 Flash Holder  
Fig. 2.11 Flash Holder with sample length  $2\ell$ .

한편 Network Analyzer의 Port와 Sample Holder는 틸이 없이 밀착되므로 식 (2.70)과 (2.71)은

$$Z(\ell) = Z_c \tanh(\gamma \ell) \quad (2.70)$$

$$Z(2\ell) = Z_c \tanh(\gamma 2\ell) \quad (2.71)$$

와 같이 쓸 수 있다. 식 (2.70)과 식 (2.71)에 하이퍼볼릭 탄젠트 공식을 적용하면,

$$\tanh(\gamma 2\ell) = \frac{2 \tanh(\gamma \ell)}{1 + \tanh^2(\gamma \ell)} \quad (2.72)$$

이 되고, 식 (2.72)를 변형하면

$$Z(2\ell) = \frac{2 \tanh(\gamma \ell)}{1 + \tanh^2(\gamma \ell)} \quad (2.73)$$

$$\tanh(\gamma \ell) = \sqrt{\frac{2Z(\ell) - Z(2\ell)}{Z'(2\ell)}} \quad (2.74)$$

이 된다. 식 (2.74)로부터  $\gamma$ ,  $Z_c$  을 도출하면

$$\gamma = \frac{1}{\ell} \tanh^{-1} \sqrt{\frac{2Z(\ell) - Z(2\ell)}{Z'(2\ell)}} \quad (2.75)$$

$$Z_c = Z'(\ell) \sqrt{\frac{Z'(2\ell)}{2Z'(\ell) - Z'(2\ell)}} \quad (2.76)$$

이 된다. 식 (2.75)와 식 (2.76)을 대입해서 풀면

$$\varepsilon_\gamma = -j \frac{C}{2\pi f} \cdot \frac{\frac{1}{\ell} \tanh^{-1} \sqrt{\frac{2Z(\ell) - Z(2\ell)}{Z'(2\ell)}}}{Z(\ell) \sqrt{\frac{2Z'(\ell)}{2Z'(\ell) - Z'(2\ell)}}} \quad (2.77)$$

$$\mu_\gamma = -j \frac{C}{2\pi f} \cdot \frac{1}{l} \tanh^{-1} \sqrt{\frac{2Z(\ell) - Z(2\ell)}{Z(2\ell)}} \quad (2.78)$$

$$\cdot \frac{1}{l} \tanh^{-1} \sqrt{\frac{2Z(\ell) - Z(2\ell)}{Z(2\ell)}}$$

이 구하여진다[13].

## 제 3 장 전파흡수체의 제작 및 특성평가

본 논문에서는 초투자율이 30,000인 센더스트를 이용하여 S-Band용 레이더의 사용주파인 2 GHz에서 4 GHz까지 전파흡수체의 두께 3 mm와 4 mm에서 10 dB 이상의 흡수능을 만족하는 전파흡수체 개발을 목표로 하였다. 센더스트의 성분비에 따른 전파흡수능을 조사하기 위하여 지지체인 CPE(Chlorinated Poly-ethylene)와의 비율을 각각 80 : 20 wt%, 75 : 25 wt%, 70 : 30 wt%로 달리해서 0.3 mm의 전파 흡수체를 제작하고, 샘플홀더에 시료를 삽입한 후에 Network Analyzer를 이용하여 반사계수를 측정된 후에 나타나는 특성을 비교 분석하였다. 그리고 전파흡수체의 전파흡수능 향상과 광대역화를 위하여 센더스트의 재료정수인 복소비유전율( $\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r''$ )과 복소비투자율( $\mu_r = \mu_r' - j\mu_r''$ ) 값을 측정하기 위해 샘플홀더에 시료를 삽입한 후에 Network Analyzer를 이용하여 각각의 반사계수를 측정한 다음 재료정수를 측정하였다. 재료정수는 측정된 반사계수 데이터를 MATLAB 프로그램으로 계산하였다. 그리고 마찬가지로, 센더스트와 지지체인 CPE와의 비율을 각각 80 : 20 wt%, 75 : 25 wt%, 70 : 30 wt%와 같이 달리해서 제작한 센더스트 전파흡수체를 적층하여 S-Band에서 10 dB 대역폭 확장을 꾀하였고, 상대적으로 입자가 큰 센더스트와 입자가 작고 비저항이 큰 수산화알루미늄을 각각 14 wt%, 15 wt%, 16 wt%로 성분비를 달리하여 혼합한 후 전파흡수체를 적층하여 S-Band에서 10 dB 대역폭을 증가시키는 방법을 연구하였다.

### 3.1 전파흡수체의 설계 및 제작

본 실험에서는 초투자율이 30,000인 센더스트와 지지체인 CPE와의 비율을 각각 80 : 20 wt%, 75 : 25 wt%, 70 : 30 wt%로 본 연구실에서 자체 제작한 Open Roller를 이용하여 1 mm의 쉬트형 전파흡수체를 제작하였다. 이 때 시편의 제작 온도는 70 °C로 일정하게 유지하였다. 센더스트는 알루미늄 5 %, 규소 10 %, 철 85 %의 조성을 가진 고투자율 합금으로써 고투자율을 가지게 된 원인은 Al-Si-Fe라는 3원소계의 조성으로부터 자기이방성상수, 자기일그러짐상수가 모두 0으로 되어 있기 때문이다.

그림 3.1은 센더스트를 이용한 전파흡수체의 제작 공정을 나타내는 그림이다.

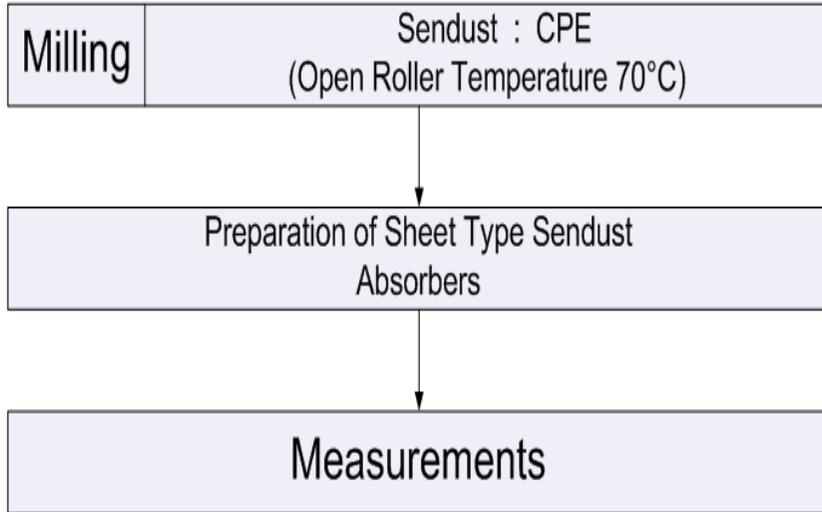


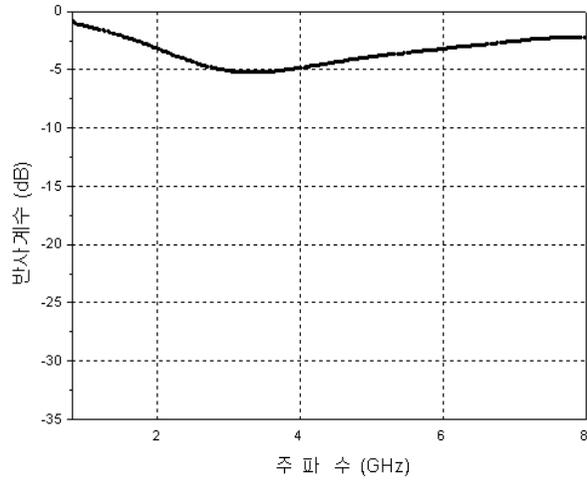
그림 3.1 센더스트를 이용한 전파흡수체의 제작과정

Fig. 3.1 Manufacturing Process of EM wave absorbers using Sendust.

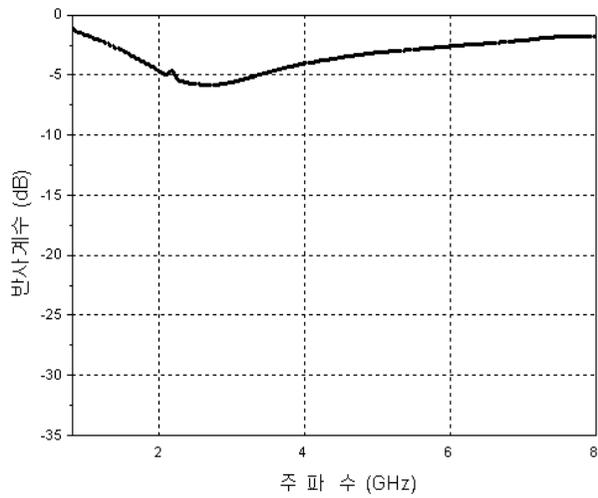
### 3.2 센더스트의 성분비에 따른 전파흡수능 및 재료정수 측정

#### 3.2.1 센더스트의 성분비에 따른 전파흡수능

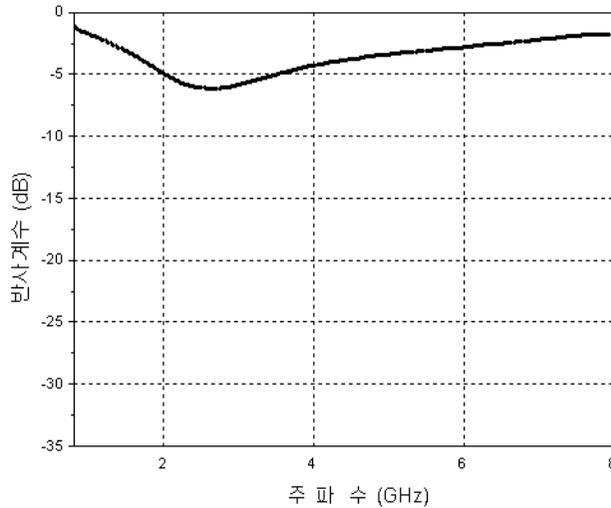
각 샘플의 전파흡수능을 측정하기 위하여 샘플홀더에 시료를 삽입한 후에 Network Analyzer를 이용하여 각각의 반사계수를 측정하였다. 측정한 반사계수는 그림 3.2에 나타내었다.



(a) 센더스트 : CPE = 70 : 30 wt%



(b) 센더스트 : CPE = 75 : 25 wt%



(c) 센더스트 : CPE = 80 : 20 wt%

그림 3.2 센더스트의 배합비에 따른 주파수를 함수로 하는 반사계수

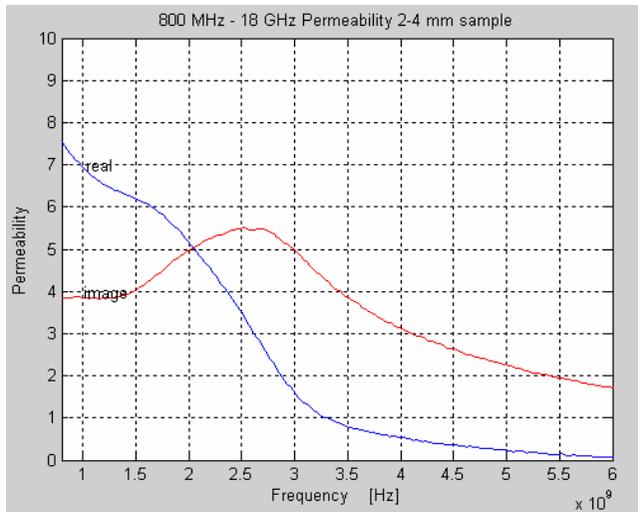
Fig. 3.2 Reflection coefficient as a function of frequency for samples with various Sendust ratio.

그림 3.2는 지지재를 CPE(Chlorinated Poly-ethylene)로하고 여기에 센더스트와의 혼합비를 센더스트 : CPE = 70 : 30 wt%, 센더스트 : CPE = 75 : 25 wt%, 센더스트 : CPE = 80 : 20 wt%로 혼합하여 두께를 1 mm로 고정한 전파흡수체를 제작한 후에 이들의 전파흡수능을 측정한 그래프이다. (a)의 경우 3.17 GHz에서 5.36 dB의 전파흡수능을 나타내고 있으며 (b)의 경우 2.62 GHz에서 5.94 dB의 전파흡수능을 나타내고 있다. 그리고 (c)의 경우 2.62 GHz에서 6.11 dB의 전파흡수능을 나타내고 있다.

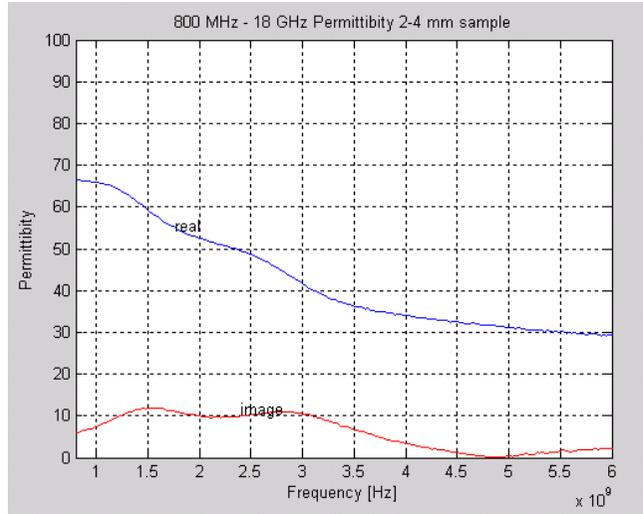
전파흡수능 측정 결과, 지지재와 전파흡수체의 두께를 고정하고 성분비를 달리하여 전파흡수체를 제작 후 전파흡수능을 측정하였을 때 센더스트의 성분비가 증가함에 따라 전체적으로 흡수능이 조금 향상되긴 하나 전파흡수체로서의 흡수능을 나타내지는 못했다. 그래서 이렇게 제작되어진 전파흡수체를 적층하여 전파흡수능과 전파흡수 대역폭의 증가를 모색하였다.

### 3.2.2 재료정수 측정

센더스트의 재료정수인 그림 3.3 (a)의 복소비투자율과 (b)의 복소비유전율을 MATLAB으로 계산하였다. 그리고 센더스트는 초투자율이 30,000인 자성손실 재료이기 때문에 투자율의 허수부가 실수부보다 큰 영역에서 효과적인 흡수능을 나타낸다. 즉, 자성 손실재료를 이용한 전파 흡수체의 흡수능은 자기 손실  $\tan\delta = (\mu''/\mu')$ 과 매우 밀접한 관계가 있으며  $\tan\delta > 1$ 일 때 우수한 흡수능을 나타낸다[14]. 본 연구에서는 S-Band인 2 GHz에서 4 GHz까지를 만족하는 전파 흡수체 개발을 목표로 하였는데 복소비투자율인 그림 3.3 (a)의 경우 투자율의 허수부가 실수부보다 커지는  $\tan\delta = 1$ 을 나타내는 주파수가 2 GHz 부근임을 볼 때 본 연구에서 제작한 전파흡수체의 재료정수 측정 결과와 연구 목표가 잘 일치하는 것을 알 수 있다.



(a)복소비투자율



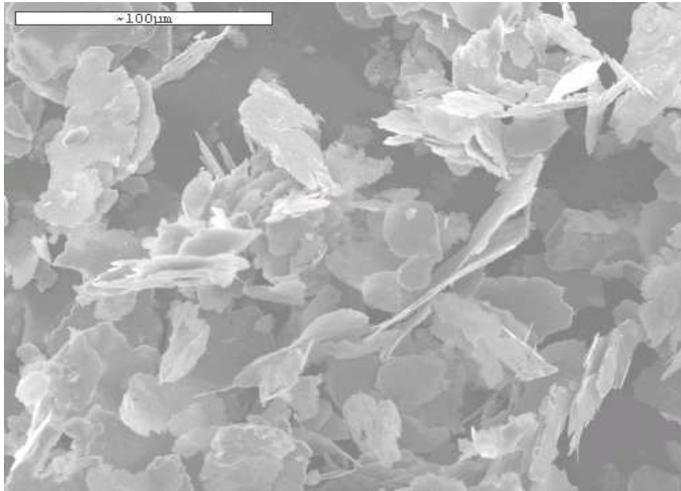
(b) 복소비유전율

그림 3.3 CPE와 혼합된 센더스트 전파흡수체의 주파수를 함수로 하는

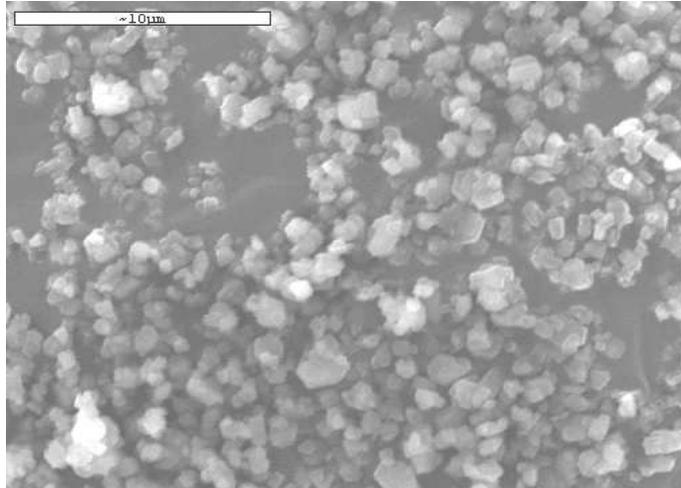
(a) 복소비투자율, (b) 복소비유전율

Fig. 3.3 (a)Permeability and (b)Permittivity as a function of frequency for samples mixed with

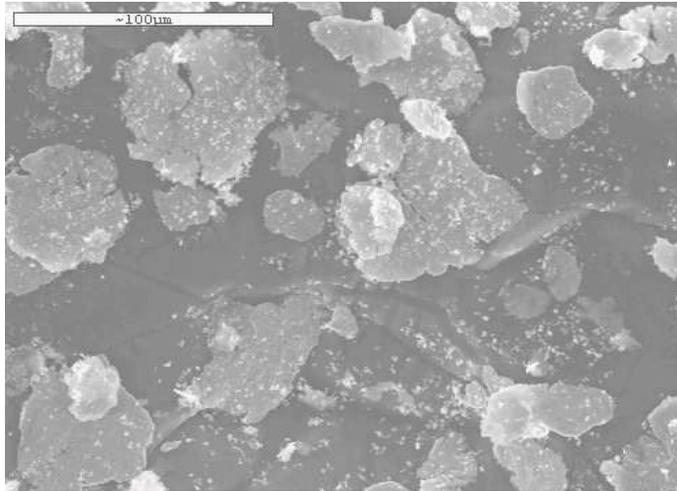
그림 3.4의 (a)는 센더스트 파우더의 표면을 주사전자현미경(Scanning Electron Microscopy)으로 500배 확대한 사진이고 (b)는 수산화알루미늄 파우더의 표면을 주사전자현미경으로 5,000배 확대한 사진이다. 그리고 (c)는 센더스트와 수산화알루미늄을 혼합한 파우더의 표면을 주사전자현미경으로 500배 확대한 사진인데 센더스트와 수산화알루미늄이 잘 혼합된 것을 알 수 있다. 입자의 크기는 센더스트의 경우 직경으로 긴지름  $74 \mu\text{m}$ , 짧은 지름  $29 \mu\text{m}$ 이고, 수산화 수산화알루미늄의 경우 구에 가까운 형태인데 직경이  $1.4 \mu\text{m}$ 이다. 사진에서와 같이 상대적으로 입자가 큰 센더스트와 입자가 작고 전기적 비저항이 큰 수산화알루미늄을 혼합하여 전파흡수 대역폭의 증가를 모색하였다.



(a) 셴더스트 파우더



(b) 수산화알루미늄 파우더



(c) 센더스트와 수산화알루미늄을 혼합한 파우더

그림 3.4 주사전자현미경 사진

Fig. 3.4 Picture of SEM(Scanning Electron Microscopy)

### 3.3 센더스트를 이용한 적층형 전파흡수체

#### 3.3.1 센더스트를 이용한 적층형 전파흡수체 설계 및 제작

본 실험은 초투자율이 30,000인 센더스트를 적층함으로써 전파흡수능 향상과 전파흡수 대역폭의 증가를 모색하였다. 일반적으로 적층은 전파흡수능의 협대역을 광대역화 시키는 중요한 공정으로 알려져 있다. 센더스트는 알루미늄 5%, 규소 10%, 철 85%의 조성을 가진 고투자율 합금으로써 고투자율을 가지게 된 원인은 Al-Si-Fe라는 3원소계의 조성으로부터 자기이방성상수, 자기일그러짐상수가 모두 0으로 되어 있기 때문이다. 센더스트를 지지체인 CPE(Chlorinated Poly-ethylene)와의 비율을 각각 80 : 20 wt%, 75 : 25 wt%, 70 : 30 wt%로 본 연구실에서 자체 제작한 Open Roller를 이용하

여 시편 두께가 2 mm인 전파흡수체를 제작한 후 적층하여 샘플홀더에 시료를 삽입한 후에 Network Analyzer를 이용하여 각각의 반사계수를 측정하였다. 이때 시편의 제작 온도는 70 °C로 일정하게 유지하도록 하였다.

그림 3.5는 센더스트를 이용한 적층형 전파흡수체의 제작 공정을 나타내는 그림이다.

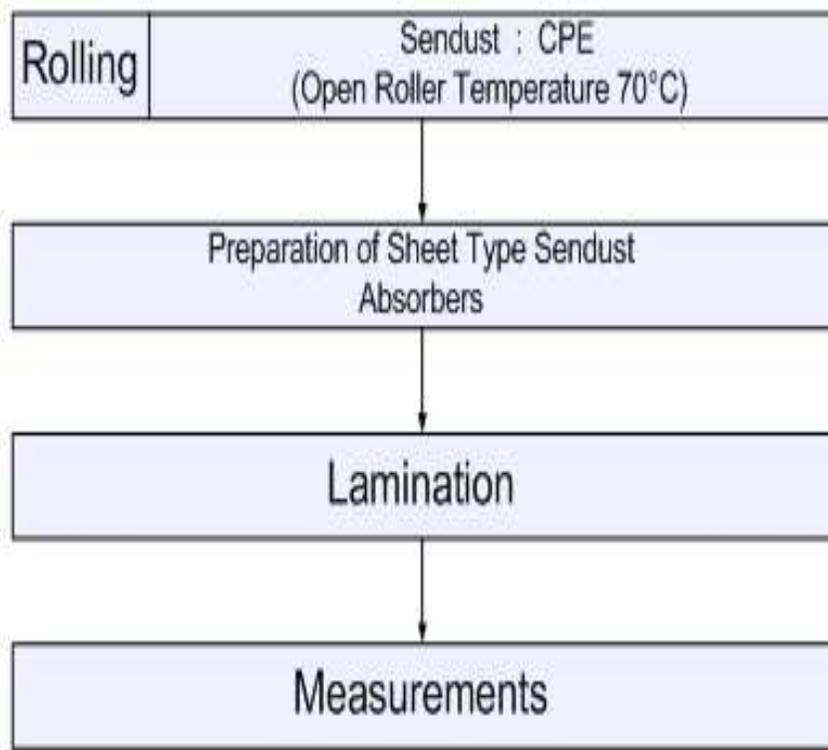


그림 3.5 센더스트를 이용한 적층형 전파흡수체의 제작과정

Fig. 3.5 Manufacturing Process of Multi-layer EM wave absorbers using Sendust.

### 3.3.2 전파흡수능 평가 및 분석

본 실험에서는 전파흡수능 대역폭의 광대역을 가지는 전파흡수체를 개발

하기 위하여 성분비를 달리하여 제작한 센더스트 전파흡수체를 적층하여 그 특성을 조사하였다.

그림 3.6은 센더스트를 이용한 4 mm의 단층형 전파흡수체 A, B와 성분비를 달리하여 제작한 두께 2 mm의 센더스트 전파흡수체를 적층한 두께 4 mm의 적층형 전파흡수체 C의 전파흡수능을 각각 나타낸 것이다. 그림에서 보인바와 같이 센더스트만을 이용해 제작한 단층형 전파흡수체에 비해 센더스트를 적층한 전파흡수체의 전파흡수능이 S-Band에서 10 dB 이상을 만족하는 주파수가 확장되었음을 보이고 있다. 따라서 단층형 센더스트 전파흡수체보다 적층형 센더스트 전파흡수체의 전파흡수 대역폭과 전파흡수능이 증가함을 확인하였다. 그림 3.7의 전파흡수체 A, B, C 각각의 전파흡수능은 그림 3.6에 나타내었고, 그림 3.7 C에서 적층 순서는 그림의 아랫면을 도체판으로 향하게 하여 적층하였다. 그리고 그림 3.7의 1, 2, 3, 4 각각의 조성비는 표 3.1에 나타내었으며 단층형 전파흡수체 A, B와 적층형 전파흡수체 C의 10 dB 대역폭을 표 3.2에 각각 나타내었다.

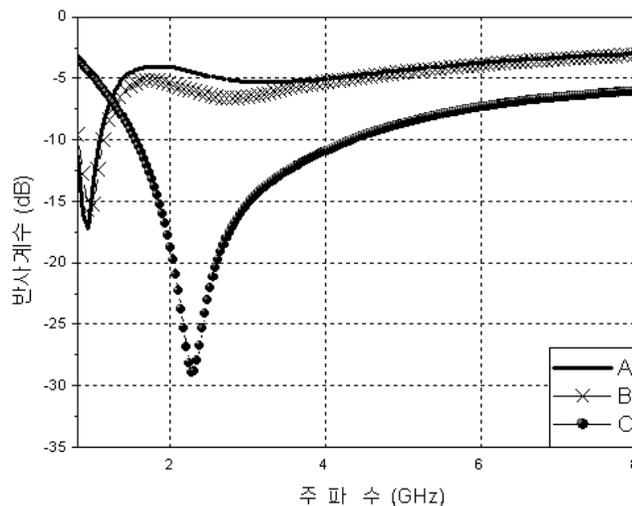


그림 3.6 전파흡수능

Fig. 3.6 EM wave absorbtion

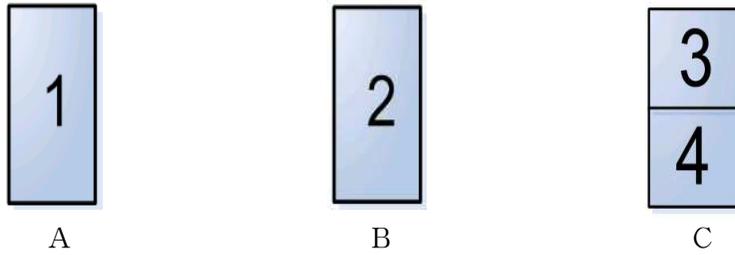


그림 3.7 단층형 전파흡수체와 적층형 전파흡수체

Fig. 3.7 Single layer and Multi-layer EM wave absorbers

표 3.1 전파흡수체 조성비

Table 3.1 Composition ratio of EM wave absorber

	Sendust	CPE	두께 [mm]
1	75	25	4
2	70	30	4
3	75	25	2
4	70	30	2

표 3.2 10 dB 대역폭

Table 3.2 10 dB Bandwidth

	10 dB 대역폭 [GHz]	두께 [mm]
A	0.8~1.0(0.2)	4
B	0.8~1.0(0.2)	4
C	1.5~4.1(2.6)	4

흡수체의 두께가 4 mm일 때 단층형 센더스트 전파흡수체는 0.8 GHz에서 1 GHz까지 0.2 GHz만 10 dB 대역폭을 만족하였지만 적층형 센더스트 전파흡수체의 경우 S-Band를 포함하는 1.5 GHz에서 4.1 GHz까지 대역폭 2.6 GHz가 10 dB를 만족하였다. 단층형 센더스트 전파흡수체보다 적층형 센더스트 전파흡수체의 대역폭이 확장되는 이유는 다음과 같다. 흡수체 표면 가까운 층에서는 그 재료정수가 공기에 가까운 재료로서 공기의 전파특성 임피던스로 정합되었고, 도체판과 가까운 층에서는 전파를 흡수하기 때문이라고 예측된다.

### 3.4 수산화알루미늄을 첨가한 적층형 전파흡수체

#### 3.4.1 수산화알루미늄을 첨가한 적층형 전파흡수체 설계 및 제작

본 실험은 초투자율이 30,000인 센더스트를 성분비를 달리해서 수산화알루미늄과 혼합하여 적층함으로써 전파흡수능 향상과 전파흡수 대역폭의 증가를 모색하였다. 일반적으로 수산화알루미늄 혼합은 전파흡수능의 협대역을 광대역화 시키는 중요한 공정으로 알려져 있다. 센더스트와 수산화알루미늄과 지지재인 CPE와의 비율을 각각 64 : 16 : 20 wt%, 60 : 15 : 25 wt%, 56 : 14 : 30 wt%로 본 연구실에서 자체 제작한 Open Roller를 이용하여 시편 두께가 1 mm인 전파흡수체를 제작한 후 적층하여 샘플홀더에 시료를 삽입한 후에 Network Analyzer를 이용하여 각각의 반사계수를 측정하였다. 이 때 시편의 제작 온도는 70 °C로 일정하게 유지하도록 하였다.

그림 3.8은 수산화알루미늄 혼합을 이용한 적층형 전파흡수체의 제작 공정을 나타내는 그림이다.

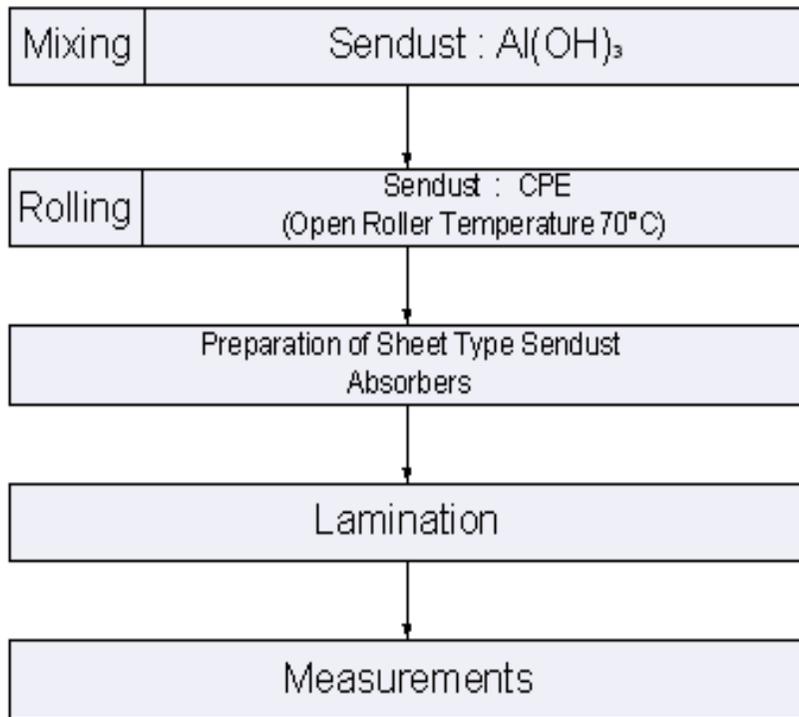


그림 3.8 수산화알루미늄을 첨가한 적층형 전파흡수체의 제작과정  
 Fig. 3.8 Manufacturing Process of Multi-layer EM wave absorbers adding  $Al(OH)_3$ .

### 3.4.2 전파흡수능 평가 및 분석

본 실험에서는 전파흡수능 대역폭의 광대역을 가지는 전파흡수체를 개발하기 위하여 성분비를 달리하여 센더스트와 수산화알루미늄을 혼합한 후에 전파흡수체를 적층하여 그 특성을 조사하였다.

그림 3.9는 센더스트에 수산화알루미늄을 혼합하지 않고 제작한 두께 3 mm의 전파흡수체 A, B와 센더스트에 수산화알루미늄을 혼합하여 제작한 두께 1 mm의 전파흡수체를 각각 적층한 두께 3 mm의 전파흡수체 C, D의 전파흡수능을 나타낸 것이다. 그림에서 보인 바와 같이 센더스트만을 이용해 적층한 전파

흡수체에 비해 샌더스트에 수산화알루미늄을 혼합하여 적층한 전파흡수체의 S-Band에서 10 dB 대역폭이 향상됨을 보이고 있다. 그림 3.10의 전파흡수체 A, B, C, D 각각의 전파흡수능은 그림 3.9에 나타내었고, 적층순서는 그림의 아랫면을 도체판으로 향하게 하여 적층하였다. 그리고 그림 3.10의 1, 2, 3, 4, 5, 6 각각의 조성비는 표 3.3에 나타내었으며 적층형 전파흡수체 A, B, C, D의 10 dB 대역폭을 표 3.4에 나타내었다.

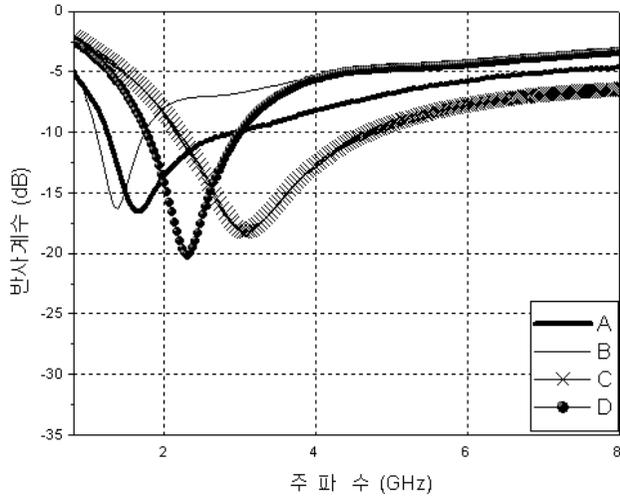


그림 3.9 전파흡수능

Fig. 3.9 EM wave absorbtion

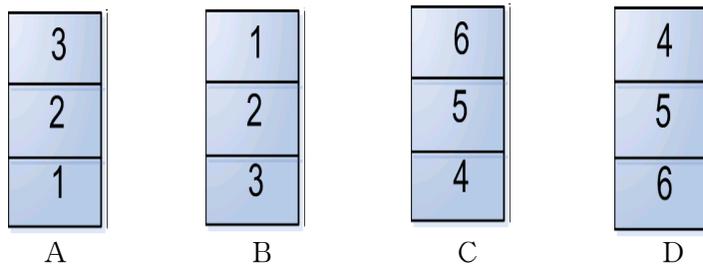


그림 3.10 적층 순서

그림 3.10 Order of Lamination

표 3.3 전파흡수체 조성비

Table 3.3 Composition ratio of EM wave absorber

	Sendust	Al(OH) <sub>3</sub>	CPE	두께 [mm]
1	80	0	20	1
2	75	0	25	1
3	70	0	30	1
4	64	16	20	1
5	60	15	25	1
6	56	14	30	1

표 3.4 10 dB 대역폭

Table 3.4 10 dB Bandwidth

	10dB bandwidth [GHz]	두께 [mm]
A	1.1~2.9(1.8)	3
B	1.0~1.9(0.9)	3
C	2.1~4.3(2.2)	3
D	1.9~3.0(1.2)	3

흡수체의 두께가 3 mm일 때 수산화알루미늄을 혼합하지 않은 적층형 센터스트 전파흡수체는 10 dB 대역폭을 1.1 GHz에서 2.9 GHz까지 대역폭 1.8 GHz와 1 GHz에서 1.9 GHz까지 대역폭 0.9 GHz를 각각 만족하였고, 수산화알루미늄을 혼합한 적층형 센터스트 전파흡수체의 경우는 10 dB 대역폭을 2.1 GHz에서 4.3 GHz까지 대역폭 2.2 GHz와 1.9 GHz에서 3 GHz까지 대역폭 1.2 GHz를 각각 만족하였다. 수산화알루미늄을 혼합하지 않은 적층형 센터스트 전파흡수체보다 수산화알루미늄을 혼합한 적층형 전파흡수체의 대역폭이 향상되는 이유는 다음과 같다. 입자가 작고 전기적 비저항이 큰 소량의 수산화알루미늄이 센터스트와 혼합되어 전파 산란 효과를 일으키기 때문이라고 예측된다.

## 제 4 장 결론

전자기기의 급격한 고주파화 추세를 감안하면 GHz 대역용 전파흡수체의 개발에 관한 연구는 매우 중요하다. 전파흡수체는 전파무향실의 벽이나 천정에 사용하거나 고층건물의 벽면이나 대형교량의 금속부재에 붙이므로 가능한 한 가벼운 것이 좋고 부착이 용이해야 한다. 따라서 박형화된 슈트형 전파흡수체가 적합하다. 그래서 본 논문에서는 전파흡수체를 개발하는데 있어 새로운 재료인 센터스트를 이용하여 제작해오던 단층형 전파흡수체의 전파흡수능 향상과 협대역인 것을 보완하는 새로운 방법으로써 슈트형인 단층형 센터스트 전파흡수체를 2층형 전파흡수체로 적층하는 방법으로 S-Band에서 전파흡수체의 대역폭과 전파흡수능을 향상시켰다. 그리고 센터스트를 이용한 2층형 전파흡수체를 박형화하기 위해서 상대적으로 입자가 큰 센터스트와 입자가 작고 비저항이 큰 수산화알루미늄을 성분비를 달리하여 혼합한 후에 제작한 슈트형 전파흡수체를 3층으로 적층함으로써 슈트형인 센터스트를 이용한 적층형 전파흡수체 개발 가능성을 제시하였고, 이를 이용한 S-Band 레이더용 전파흡수체 개발을 위한 기초연구이다.

초투자율이 30,000인 센터스트를 이용하여 센터스트를 적층, 센터스트와 수산화알루미늄을 혼합하여 적층하며 시편의 재료정수, 주사전자현미경 사진 등을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 센터스트를 이용하여 지지재인 CPE와의 비율을 각각 80 : 20 wt%, 75 : 25 wt%, 70 : 30 wt%의 비율로 전파흡수체를 두께 2 mm로 제작하여 4 mm인 2층형으로 적층함으로써 S-Band에서 전파흡수체의 전파흡수능 향상과 대역폭을 향상시켰다. 흡수체의 두께가 4 mm일 때 2층형 센터스트 전파흡수체는 0.8 GHz에서 1 GHz까지 대역폭 0.2 GHz에서만 10 dB 대역폭을 만족하였지만 2층형 센터스트 전파흡수체의 경우 S-Band를 포함하는 1.5 GHz에서 4.1 GHz까지 대역폭 2.6 GHz에서 10 dB 대역폭을 만족하였다.

(2) 센터스트와 수산화알루미늄과 지지재인 CPE와의 비율을 각각 64 : 16 : 20 wt%, 60 : 15 : 25 wt%, 56 : 14 : 30 wt%로 전파흡수체를 두께 1 mm로 제작하여 두께 3 mm인 3층형으로 적층함으로써 4 mm인 2층형 전파흡수체보다 박형화시켰다. 흡수체의 두께가 3 mm일 때 수산화알루미늄을 혼합하지 않은 적층형 센터스트 전파흡수체는 적층순서에 따라 10 dB 대역폭을 1.1 GHz에

서 2.9 GHz까지 대역폭 1.8 GHz와 1 GHz에서 1.9 GHz까지 대역폭 0.9 GHz를 각각 만족하였고, 흡수체의 두께가 3 mm일 때 수산화알루미늄을 혼합한 적층형 센더스트 전파흡수체의 경우는 적층순서에 따라 10 dB 대역폭을 2.1 GHz에서 4.3 GHz까지 대역폭 2.2 GHz와 1.9 GHz에서 3 GHz까지 대역폭 1.2 GHz를 각각 만족하였다.

본 연구에서 개발한 센더스트를 이용한 적층형 전파흡수체는 실용성을 겸비한 고성능 전파흡수체로서 S-Band용 레이더에 실질적인 응용이 기대된다.

## 참 고 문 헌

- [1] (김동일, 전상엽, “EMI/EMC 대책용 광대역화 전파흡수체의 개발에 관한 연구”, 한국향해학회지 제15권 제4호, pp. 13-35, 1991. 12)
- [2] (최형도, 채종석, 김덕원, 한용석, 이원재 “전자파 리스크 커뮤니케이션 환경분석 및 대국민 홍보 방안”, 제6회 전자기장의 생체 영향에 관한 워크숍. pp. 55, 2002. 10)
- [3] (David M. Pozar, Microwave Engineering, Addison-Wesley, 1990)
- [4] 강덕근, “새로운 전자파장해관련 기준 재/개정”, 전파진흥지, pp.11-16, 1996. 11.
- [5] C, L. Holloway and E. F. Kuester, "A low-frequency model for wedge or pyramid absorber arrays-II: Computed and measured results," IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, Vol. 36, No.4, Nov. 1994.
- [6] 김동일, 이창우, 전상엽, 정세모, “초광대역특성을 갖는 정방형 페라이트 기둥구조의 전파흡수체 설계법”, 한국향해학회지 제 19권 제 2호, pp.99-106, 1995.
- [7] 김동일, 박지용, “광대역특성을 갖는 다층구조 페라이트 전파흡수체의 최적 설계”, 한국통신학회 부산·경남추계합동학술발표회, pp.58-62, 1996.
- [8] 김동일, 박종구, 원영수, 이영구, 정세모, “원추절단형 및 원기둥형 광대역 페라이트 전파흡수체 개발에 관한 연구”, 한국전자파학회논문지, 제11권, 제 6호, pp.721-725, 2000. 11.
- [9] (Dong Il Kim, Jae Young Bae, Jun Yong Son, Young Su Won and Jae Man Song, "A Study on Fabrication and Evaluation of Ferrite Wave Absorber", Journal of The Korean Electromagnetic Engineering Society, vol. 1 no. 1, pp.95-99, 2001)
- [10] 김동일, “전파흡수체공학”, 대영사, 2006
- [11] (김동일, 안영섭, 정세모, “레이다용 광대역형 고성능 전파흡수체의 개발에 관한 연구”, 한국향해학회지, 제15권 제1호, pp.11-9, 1991.3)
- [12] 橋本修, “電波吸收体入門”, 森北出版社, p. 13, 1997
- [13] 김동일, 안영섭, 정세모, “ 전파흡수체의 전파흡수특성 측정기법에 관한

- 연구”, 한국향해학회지, 제16권 제4호 pp. 25-34, 1992. 12
- [14] Y. Hashimoto, "The application of ferrite as an absorber", Jap. J. Appl. Phys. vol. 6, no. 3, pp. 175-17, 1983

## 본 논문과 관련된 발표논문

### 국내 학술회의 발표논문

[1] 류재민, 김동일, 제승훈 “Sendust를 이용한 적층형 전파흡수체의 개발”, 2006도 한국항해항만학회 춘계학술대회논문집, pp. 97-101, 2006. 6. 1~2

### 학술지 게재논문

[2] 류재민, 김동일, 제승훈 “센더스트를 이용한 적층형 전파흡수체의 개발”, 2006도 한국항해항만학회지 제 30권 제 8호, pp. 637-642, 2006. 10