

工學博士 學位論文

카본을 사용한 X-Band용 積層形 廣大域  
電波吸收体の開發에 관한 研究

A Study on Development of Broad-Band EM Wave  
Absorber for X-Band in Double-Layered Type  
Using Carbon

指導教授 金 東 一

2006年 8月

韓國海洋大學校 大學院

電波工學科

朴 又 根

本 論 文 을 朴 又 根 의 工 學 博 士  
學 位 論 文 으 로 認 准 함

委 員 長 : 工 學 博 士 鄭 世 謨



委 員 : 工 學 博 士 金 珉 奭



委 員 : 行 政 學 博 士 金 基 文



委 員 : 工 學 博 士 尹 榮



委 員 : 工 學 博 士 金 東 一



2006年 8月

韓 國 海 洋 大 學 校 大 學 院

電 波 工 學 科

朴 又 根

## 감사의 글

머나먼 길을 걸어온 것 같습니다.

뭔가를 해 보려고 하루하루를 보내며 시간을 죽였으나 아직도 제대로 된 것 같지는 않습니다. 아마도 끝이 없는 길인 것 같습니다.

이 시점에서 주위를 둘러보니, 격려를 해 주시고 용기를 주시며 관심을 보이셨던, 감사해야 할 분들이 너무나 많은 것 같습니다.

우선, 만학으로 여러모로 부족함이 많은 저에게 박사과정을 무사히 마칠 수 있도록 지도해 주시고 인도해 주신, 김동일 지도교수님께 감사의 인사를 드립니다. 그리고 부족한 논문을 끝까지 세심하게 다듬어 주신 정세모 교수님, 김기문 교수님, 운영 교수님, 부경대학교 김민석 교수님께도 감사의 인사를 드립니다.

또, 많은 가르침을 주신 전파공학과 조형래 교수님, 정지원 교수님, 강인호 교수님, 김기만 교수님, 민경식 교수님께도 감사의 인사를 드립니다.

박사과정의 길에 접어들 수 있도록 조언을 주시고, 도와주시고 가르쳐 주신 동의대학교 안점영 교수님과 하홍곤 교수님께도 감사의 인사를 드립니다.

그리고 학업을 계속 할 수 있도록 도와주시고 가르쳐주신 울산대학교 김복만 교수님과 정은 교수님께도 감사의 인사를 드립니다.

본 논문이 작성되기까지 실험을 도와주고 논문작성에 많은 도움을 준 박사과정 후배인 최동한 박사, 최창묵 대위, Rui Li 에게도 감사의 마음과 情을 보내고 싶습니다. 아울러 여러모로 많은 도움을 준 마이크로 파실험실의 선후배님들께도 감사의 마음을 전합니다.

어린 시절 시골에 있던 촌놈을 부산으로 데려와 공부를 할 수 있게

보살피 주신 박오봉 삼촌과 이영선 숙모님께 존경과 감사의 마음을 전합니다.

또 학업을 계속할 수 있게 도와주시고 직장 생활을 잘 할 수 있도록 조언을 많이 주신 큰 매형 배중한 님과 누님께도 진심어린 감사를 드립니다.

바라는 아들을 낳아 놓고도 자식이 어려서부터 객지 생활을 하는 바람에 제대로 함께 살아보지도 못하고, 항상 자신의 안위보다는 자식의 앞날과 건강만을 걱정하시며 살아오신 어머님께 감사의 말씀과 함께 만수무강을 기원합니다. 또한 돌아가신 아버님의 영전에 이 영광을 바칩니다.

공부한다고 핑계 대며 시간을 내어주지 않는다고, 짜증이 날것이지만 항상 협조해주고 도와준 사랑하는 아내 이연옥과 사랑스런 송이, 란, 지환에게도 감사와 사랑하는 마음을 전합니다.

이제 저우 스스로 읽을 수 있는 수준이건만 조금은 허탈한 마음과 이제는 또 뭔가를 해도 좋을 것 같은 마음 가벼운 기분이 듭니다.

시간과 마음의 여유가 생겼으니 앞으로의 인생을 어떻게 보내는 게 좋은 것인지 찬찬히 생각하며 조금은 여유 있는 시간을 보내고 싶습니다.

다시 한 번, 도와주시고 관심을 가져준 모든 분들께 진심으로 감사의 마음을 드립니다. 항상 행복 하십시오.

2006년 8월 박 우 근

# << 목 차 >>

<b>Nomenclature</b> .....	iii
<b>Abbreviations</b> .....	v
<b>Abstract</b> .....	vi
<b>제 1 장 서론</b> .....	1
1.1 연구 배경 .....	1
1.2 연구 목적 .....	3
1.3 연구 방법 .....	4
<b>제 2 장 전파흡수체의 기본이론</b> .....	6
2.1 전파흡수체의 의의 .....	6
2.2 전파흡수체의 원리 .....	7
2.2.1 평면파의 개념 .....	7
2.2.2 에너지의 흡수원리 .....	10
2.3 전파흡수체의 분류 .....	13
2.3.1 전파흡수 재료에 의한 분류 .....	13
2.3.2 형태에 의한 분류 .....	14
2.3.3 층수에 의한 분류 .....	14
2.3.4 주파수 특성에 의한 분류 .....	16
2.4 전파흡수체의 용도 .....	18
2.5 정합조건 .....	24
2.5.1 단층형 전파흡수체 .....	24
2.5.2 다층형 전파흡수체 .....	27
2.5.3 광대역형 전파흡수체 .....	30
<b>제 3 장 전파흡수체 설계 이론 및 재료정수 측정법</b> .....	33
3.1 전파흡수체의 분포정수회로화 .....	33
3.1.1 파동방정식(Helmholtz Equation) .....	33
3.1.2 분포정수회로화 .....	38

3.2 전파흡수체 손실재료와 재료정수 측정법 .....	43
3.2.1 손실재료 .....	43
3.2.2 재료정수 측정법 .....	52
3.2.3 표면저항 측정법 .....	59
<b>제 4 장 전파흡수체 제작 및 재료정수 측정 .....</b>	<b>61</b>
4.1 전파흡수체 제작방법 .....	61
4.2 전파흡수체 샘플의 제작 .....	62
4.3 복소비유전율 측정 .....	63
4.3.1 사용된 Sample 및 Sample Holder .....	63
4.3.2 복소비유전율 계산방법 .....	66
4.3.3 샘플의 조성비에 따른 복소비유전율 .....	68
4.4 표면저항 측정 .....	72
4.4.1 사용된 측정 시스템 .....	72
4.4.2 측정결과 .....	73
<b>제 5 장 시뮬레이션 및 측정 결과 .....</b>	<b>74</b>
5.1 단층형일 경우 .....	74
5.1.1 시뮬레이션 결과 .....	74
5.1.2 실측정 결과 .....	79
5.1.3 시뮬레이션 값과 실측치 비교 .....	84
5.2 2층형일 경우 .....	94
5.2.1 시뮬레이션 결과 .....	94
5.2.2 실측정 결과 .....	97
5.2.3 시뮬레이션 값과 실측치 비교 .....	99
5.3 3층형일 경우의 시뮬레이션 결과 .....	101
<b>제 6 장 결론 .....</b>	<b>103</b>
<b>참 고 문 헌 .....</b>	<b>105</b>

## Nomenclature

- $\mathbf{B}$  : Magnetic flux density vector
- $C$  : Capacitance per unit length
- $\mathbf{D}$  : Electric flux density vector
- $d_n$  : Thickness of n\_th layer
- $\mathbf{E}$  : Electric field vector
- $G$  : Conductance per unit length
- $\mathbf{H}$  : Magnetic field vector
- $I$  : Current
- $\mathbf{J}$  : Electric conduction current density vector
- $L$  : Inductance per unit length
- $R$  : Resistance per unit length
- $V$  : Voltage
- $Y$  : Admittance
- $Z$  : Impedance
- $\hat{z}$  : Normalized impedance
- $Z_c$  : Characteristic impedance
- $\hat{z}_c$  : Normalized characteristic impedance
- $z_n$  : Input impedance of n\_th layer
- $\alpha$  : Attenuation constant
- $\beta$  : Phase constant

- $\Gamma$  : Reflection coefficient
- $\gamma$  : Propagation constant
- $\varepsilon$  : Permittivity
- $\varepsilon_0$  : Permittivity of vacuum
- $\varepsilon_{eq}$  : Equivalent permittivity
- $\varepsilon_{rn}$  : Relative permittivity of n\_th layer
- $\lambda$  : Wave length of free space
- $\mu$  : Permeability
- $\mu_0$  : Permeability of vacuum
- $\mu_{eq}$  : Equivalent permeability
- $\mu_{rn}$  : Relative permeability of n\_th layer
- $\sigma$  : Conductivity
- $\omega$  : Angular velocity



# Abbreviations

ANSI	:	American National Standards Institute
CISPR	:	International Special Committee on Radio Interference
CPE	:	Chlorinated Polyethylene
EMC	:	Electromagnetic Compatibility
EMI	:	Electromagnetic Interference
EMS	:	Electromagnetic Susceptibility
FCC	:	Federal Communications Commission
IEC	:	International Electromagnetic Commission
TEM	:	Transverse Electro Magnetic
TE	:	Transverse Electric
TM	:	Transverse Magnetic
MW	:	Molecular Weight

# Abstract

## **A Study on Development of Broad-Band EM Wave Absorber for X-Band in Double-Layered Type Using Carbon**

**Woo Keun Park**

**Dept. of Radio Sciences & Engineering**

**Graduate School, Korea Maritime Univ.**

**Supervisor : Prof. Dong Il Kim, Ph. D**

With the rapid advancements in electronics industry and radio communication technology, mankind might enjoy its abundant life. On the other hand, serious social problems such as electromagnetic interference (EMI) and electromagnetic susceptibility (EMS) have arisen due to the increased use of electromagnetic waves.

Therefore, countermeasure against electromagnetic waves obstacle was embossed to important subject. International organizations such as CISPR, FCC, ANSI, have provided the standards for the EM wave environments and for countermeasure of the electromagnetic compatibility (EMC).

Unnecessary electromagnetic waves leak from the circuits of communication equipment and electronic equipment or such electromagnetic waves cause the equipment to malfunction. Problems regarding EMC are more likely to occur, as smaller, lighter, and more sophisticated electronic equipment is made and the packaging density of electronic components increases drastically. These problems can be

eliminated through the use of EM wave absorber.

Absorption materials of EM wave absorber is well-known as soft and hard magnetic materials. Soft ferrites, such as Mn-Zn ferrite and Ni-Zn ferrite are useful materials for EM wave absorbers, but the magnetic loss of them decreases quickly in the GHz range. Hard ferrites, such as Ba ferrites and Sr ferrites show high magnetic loss in the GHz range, so they are useful materials for EM wave absorbers in the GHz range.

In this dissertation, the EM wave absorber using dielectric material of carbon was proposed and investigated. The EM wave absorbers are fabricated in different proportions of carbon and chlorinated polyethylene (CPE), and their input impedances are measured. The permittivity is calculated by the measured data, and the sheet resistivity is measured by the four point probe system. The EM wave absorption abilities are simulated according to different thicknesses of the EM wave absorbers, and then multi-layer type EM wave absorbers with broad bandwidth characteristics are simulated and fabricated in accordance with different layer-sequence.

As a result, the prepared carbon EM wave absorbers show excellent absorption ability. The measured results agree well with the simulated ones.

In addition, the two-layered EM wave absorbers consist of materials (carbon : CPE = 60 : 40 vol.% and carbon : CPE = 70 : 30 vol.%) showed an improvement of the broadband EM wave absorber, and the absorption ability of EM wave absorber showed over 10 dB in the frequency band from 7.8 GHz to 13.3 GHz with thickness of 2.5 mm.

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구 배경

전자통신기술의 발달은 인류의 일상생활을 편리하게 하는데 많은 기여를 했으나, 또 한편으로 늘어난 전파자원에 의한 영향으로 장비들 간 서로 불필요한 전파를 방사하게 되어 오작동 등을 일으키는 원인이 되기도 한다. 특히 최근 정보통신과 관련된 장비들이 초소형화, 경량화, 자동화로 발전하면서 장비 사용이 급증하여, 장비들 간에 서로 불필요한 전자파를 방사함으로써 불요전자파에 의해 각종 산업 현장에서의 생산 설비나 컴퓨터 단말기의 오동작, 교통수단 및 핵발전소의 제어 장치의 오동작 등과 같은 전자파장해문제와 이러한 기기 오동작으로 인해 인명에 치명적인 피해를 끼친 사례들이 보고되고 있으며 갈수록 증가해 가는 추세이다. 또한 디지털기기의 소형화, 멀티미디어화에 따라 회로 내 전자파 제거에 대한 수요가 커지면서 기존 전자파차폐(shielding)기술에 이어 흡수(absorbing)기술이 주목 받고 있다. 특히 전자파 간섭(EMI ; Electromagnetic Interference) 및 전자파 적합성(EMC ; Electromagnetic Compatibility)문제가 심각하게 고려되는 시점에서 마이크로웨이브 중계에 의한 다중통신과 항공기 및 이동물체의 전파유도기술의 발달, 그리고 레이더의 고성능화에 따라 측정 및 평가의 정밀화와 불요전자파 복사방지를 위한 전자파흡수체의 활용이 점차 증가되는 추세이다. 이와 같은 이유로 전자파 장해에 대한 대책이 사회적으로 큰 관심을 끌고 있다.

이에 각국은 전자파 장해에 대한 대책을 마련하게 되는데, 국제적으로는 미국연방통신위원회(FCC ; Federal Communications Commission), 미국표준협회(ANSI ; American National Standard Institution), 국제전기표준회의(IEC ; International Electrotechnical Commission) 등의 기술기준이 제정되었고, 국내에서도 전자통신용 장비의 전자파장해(EMI ; Electromagnetic Interference) 및 전자파내성(EMS ; Electromagnetic Susceptibility) 문제에 대한 규제를 제정하여 운용하고 있다[1]. 전자파장해 방지에 관한 국제적인 검토와 규격은 주로 IEC의 산하 기구인 국제무선장해특별위원회(CISPR ; International Special Committee on Radio Interference)에서 다루어지고 있다.

이러한 전자파장해에 대한 대책을 수립하기 위해서는 불요전자파의 방사를

억제하기 위한 EMI 제어 및 EMI 측정이 필수적이며 EMC 분야에서는 전자파 환경의 정량화, 전자계분포의 측정 및 전자펄스의 측정 등이 필요하다[2],[3].

전파흡수체의 연구를 역사적으로 살펴보면 다음과 같이 구별할 수 있다. 제 1세대는 주로 전쟁 중에 행해졌기 때문에 레이더 전파를 흡수하는 것을 목적으로 하고 있으며, 제 2세대는 안테나를 중심으로 하는 전파소자의 특성을 측정하는 전파암실을 만들기 위해 필요한 전파흡수체의 개발을 목적으로 하였다. 제 3세대는 전자기기로부터의 누설전파 규제를 만족하는 제품의 검사 또는 내성(Immunity)의 측정을 위한 전파암실을 만들기 위한 전파흡수체의 개발을 목적으로 하고 있다.

제 1세대의 흐름은 현재에도 TV전파의 불요반사파 흡수로서 계속되고 있다. 제 2세대의 특징은 주파수가 마이크로파대이고 제 3세대인 현재는 하한주파수가 30 MHz인 저주파로 하는 것이 특징이다. 즉, CISPER의 Pub.22에 의하여 30 MHz에서 1000 MHz의 주파수 범위에서 전자기기로부터의 누설전파의 규제가 정해져 있고, 이것을 측정하는 전파암실을 구축하기 위해서는 이 주파수에 대해서 충분한 반사감쇠량을 갖는 전파흡수체를 개발할 필요가 있다. 특히, 금후 30 MHz 이상의 모든 주파수대역을 덮는(Cover) 두께가 얇은 전파흡수체의 개발연구가 필요하고 이것을 제 4세대라 부를 수 있을 것이다[4].

전파흡수체는 손실재료를 이용하여 입사한 전자파를 흡수하여 열로 변환시켜 반사파가 발생하지 않도록 하는 특수 재료를 말한다. 이러한 손실재료는 도전성 손실재료, 유전성 손실재료, 자성 손실재료 등이 있다. 도전성 손실재료는 도전전류에 따라 전파를 흡수하는 것으로 도전성섬유 등이 있으며, 유전성 손실재료로는 카본고무, 카본 함유 발포우레탄, 카본함유 발포 폴리에틸렌 등이 있다. 또, 자성 손실재료의 대표적인 것은 페라이트(Ferrite)인데, 이 재료는 넓은 주파수대역에 걸쳐 양호한 흡수특성을 나타낸다. 페라이트 전파흡수체의 재료 정수 측정은 샘플홀더(Sample holder)에 의한 측정법에 의하여 행해지며, 제작된 전파흡수체의 TEM 모드에서 흡수능은 반사계수법으로 행한다. 이 방법은 전파흡수체에 최적화된 각도에서 송신기를 이용하여 전파를 방사하고 전파흡수체에서 반사하는 전파를 수신기에서 수신하는 방법으로 측정 시스템을 구축해야 하므로 비용이 많이 든다[5]-[7].

따라서 보다 저렴한 전파흡수체 특성측정기법에 대한 연구가 현재 진행되고 있고, 전파무향실의 특성평가 역시 더욱 정밀한 결과가 예상되고 있다. 자성재

료인 페라이트를 이용한 전파흡수체는 우수한 흡수특성으로 인하여 타일형과 그리드형의 이면에 금속판을 부착한 형태로 Naito에 의하여 개발되었다[8],[9].

전자·정보통신기술의 발전과 더불어 전파사용 또한 늘어나고 있으며 전파의 사용이 늘어나면 늘어날수록 우리가 원하지 않는 불요전자파 또한 늘어날 것이다. 그러므로 높은 주파수대의 전파흡수체 개발과 광대역화가 절실히 요구되고 있다.

전파흡수원리에서 도전손실이나 유전손실에 비해 자성손실이 크기 때문에 GHz 대역에서는 ferrite 같은 자성손실 재료를 이용하여 연구가 많이 수행되고 있으며, 특히 MnZn ferrite나 NiZn ferrite 같은 soft ferrites와 Sr ferrite나 Ba ferrite 같은 hard ferrites가 GHz 대역에서 자기적 손실이 증가되어 전파흡수체 재료로서 널리 이용되고 있다[10],[11].

그러나 본 논문에서는 유전손실 재료인 카본을 이용하여 GHz 대역용 전파흡수체 개발하고자 카본을 일정 조성비별로 혼합하여 전파흡수체를 제작하였다. 그리고 카본은 비자성재료이기 때문에 조성비별 각각의 전파흡수체에서 재료정수인 복소비유전율( $\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r''$ )만을 계산하고 이 데이터를 이용하여 두께별 전파흡수능이 어떻게 변화하는가를 시뮬레이션(Simulation)으로 전파흡수체를 설계하여 실 제작 후 전파흡수능 측정치와 비교하였다. 다음으로 전파흡수체의 광대역화를 위해서 시뮬레이션을 통해 적층 순서를 결정하고 흡수대역폭이 어떻게 변화하는지 예측하였으며, 전파흡수체를 실제 제작하여 실제 전파흡수능 측정치와 비교분석하였다.

## 1.2 연구 목적

전파흡수체 재료로 자성손실재료인 ferrite를 사용하여 많은 연구가 행하여져 왔고, 또 다양한 형태의 흡수체 개발에 관한 연구가 이루어져 왔다. 그러나 기존의 Sheet형 전파흡수체나 타일형 페라이트 전파흡수체는 흡수 주파수대가 좁아서 Sheet형의 경우에는 원하는 주파수와 흡수능에 맞게 전파흡수체를 제작하기 위해서 지지재와의 혼합비율을 조정하거나 두께를 변화시켜서 제작하였다. 또 전파흡수재료와 지지재 이외에 다른 물질들을 첨가해서 제작해 왔을 뿐만 아니라 제작 과정에서의 여러 가지 환경적 요인들이나 재료의 입자크기 등

다양한 제어 요인들 때문에 한 번에 원하는 전파흡수체를 제작하기란 정말 어려운 실정이다.

그래서 원하는 주파수대에서 원하는 흡수능을 가지는 전파흡수체를 보다 쉽고 빠르게 찾아내기 위해서 전파흡수체의 제어 요인 중 하나인 두께에 따라서 흡수능이 어떻게 변하는지를 전파흡수체의 재료정수를 가지고 시뮬레이션을 하여 최적의 두께를 구하였다. 또한 전파흡수체의 흡수능을 광대역화하기 위해 각 조성비별 전파흡수체에 대하여 다층형(Multi-Layer Type)전파흡수체를 제작할 때 금속판을 기준으로 어떤 전파흡수체를 먼저 적층을 할 것인지, 또 각 전파흡수체의 두께는 얼마로 해야 보다 더 광대역 전파흡수체를 제작할 수 있는지를 시뮬레이션하고, 시뮬레이션 결과에 따라 전파흡수체를 제작하여 실제 측정치와 시뮬레이션에 의한 계산치를 비교함으로써 본 연구의 타당성을 입증하고자 하였다.

본 논문에서는 도전손실재료인 카본을 사용하고 지지재로 CPE를 사용하여 전파흡수체를 제작하고, 두께 3 mm 이내로 X-Band(8 ~ 12.5 GHz)에서 10 dB 이상의 전파흡수능을 구현하는 것을 최종 연구목표로 삼았다.

### 1.3 연구 방법

전파흡수원리에서 도전손실이나 유전손실에 비해 자성손실이 크기 때문에 GHz 대역에서는 ferrite 같은 자성손실 재료를 이용하여 연구가 많이 수행되고 있으며, 특히 MnZn ferrite나 NiZn ferrite 같은 soft ferrites와 Sr ferrite나 Ba ferrite 같은 hard ferrites가 GHz 대역에서 자기적 손실이 증가되어 전파흡수체 재료로서 널리 이용되고 있다. 따라서 본 논문에서는 자성재료에서 벗어나 비자성재료인 카본을 사용하여 전파흡수체를 제작 조성비별 흡수대역을 분석하였으며, 전파흡수체를 광대역화 하기 위해서 여러 층으로 적층하는 다층형 전파흡수체를 제작하면서 보다 쉽고 빠르게 제작하기 위해 다음과 같은 순서로 행하였다.

먼저 손실재료로 카본을 사용하고, 지지재로 CPE(chlorinated polyethylene)을 사용하여 전파흡수체를 제작하였다.

제작된 전파흡수체들의 두께가  $l$  일 때와  $2l$  일 때의 임피던스를 측정하여 길

이  $l$ 의 변화에 의한 재료정수 측정법을 이용하여 MatLab으로 재료정수인 복소 비유전율을 계산한 다음 계산된 데이터를 이용하여 전파흡수체의 두께에 따른 흡수능을 시뮬레이션하고 실제 측정된 측정치와 비교 분석하였다. 또 전파흡수체의 표면저항을 측정 분석하여 다층형 전파흡수체를 구성할 때 적층의 순서를 결정하는데 참고하였다. 그리고 표면저항 분석 및 시뮬레이션으로 최적 두께 및 조성비를 결정하여 설계한 다층형 광대역 전파흡수체를 제작하고, 시뮬레이션 상의 전파흡수능과 실제 측정된 전파흡수능을 비교 분석하였다.

따라서 본 논문의 구성은 다음과 같다.

제2장에서는 전파흡수체의 기본 원리와 용도 그리고 종류별 정합조건에 관해서 알아보고, 제3장에서는 전파흡수체 설계이론 및 재료정수 측정법에 대하여 검토하였으며, 제4장에서는 설계이론에 의한 전파흡수체의 실제제작 및 재료정수 측정, 표면저항 측정 및 분석하였다. 그리고 제5장에서는 제작된 전파흡수체의 단층일 경우와 다층일 경우 각각의 시뮬레이션 및 실제 측정치를 비교 분석하고, 마지막 제6장에서는 본 연구의 결론을 맺는다.



# 제 2 장 전파흡수체의 기본이론

## 2.1 전파흡수체의 의의

전파흡수체란 입사한 전파의 에너지의 대부분을 내부에서 열에너지로 변환하는 재료라고 할 수 있다. 여기서 말하는 전파란 항공기나 선박의 레이더등 비교적 멀리서오는 반사파 또는, 전자기기 내부의 노이즈, 실내 무선LAN 등을 설치할 때에 발생하는 반사파 등과 같이 대부분 기기의 성능을 저하시키거나 트러블의 원인이 되는 불요전파이다. 또한 열에 변환되기 때문에 그것에 따른 흡수체의 내부온도는 상승하게 되지만, 통상 사용되고 있는 범위에 있어서는 외부로 열이 방사되어 때문에 흡수체 자체의 온도는 거의 올라가지 않는다.

이러한 전파흡수체는 전자파의 반사를 저감하기 위한 것으로서, 당초에는 적의 레이더에 잠수함이나 비행기가 탐지되지 않도록 하는 등의 군사 장비면에서의 요구나 전파암실을 구축하기 위해 이용하는 것이 주된 사용 목적이었다. 그러나 근래에 들어서는 전자렌지(microwave oven)나 컴퓨터 등과 같이 우리의 주변에서 전자파가 많이 발생되고 있으며, 이들 전자기기에서 방사되는 불요전파가 다른 전자기기에 악영향을 주고 있다. 이와 같이 전파환경이 갈수록 악화되어 가는 상황 하에서는 여기에 대처할 수 있는 각종 전파흡수체에 대한 개발의 필요성이 더욱 증가되고 있다. 특히, 최근 전자파가 인체에 미치는 영향에 대한 관심이 고조되면서 전자파방해 대책용으로서의 전파흡수체의 이용은 점점 활발해지고 있다[12],[20].

전파 흡수체는 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[12].

## 2.2 전파흡수체의 원리

### 2.2.1 평면파의 개념

전파흡수체의 흡수원리나 설계법을 이해하기 위해서는 공간을 전파(傳播)하는 평면파에 관한 기초적 지식이 필요하다. 먼저 평면파의 전파에 관한 편파의 개념과 사입사특성을 설명한다.

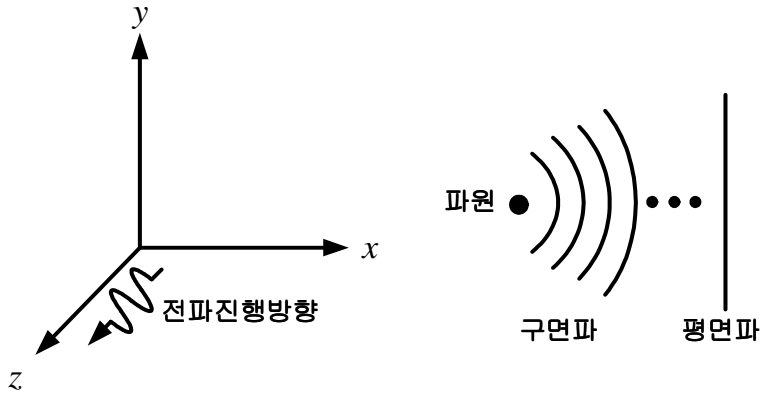


그림 2.1 평면파와 등위상면

Fig. 2.1 Plane wave and in-phase plane

그림 2.1에 나타내는 바와 같이 전파원으로부터 공간에 방사된 전자파는 공간을 전파함에 따라, 위상면이 직선상인 평면파로 된다. 여기서는, z축 방향으로 전파하는 평면파에 관해서, 다음의 맥스웰방정식으로부터 그 전자계를 검토해 보자.

$$\nabla \times E = -\mu_0 \frac{\partial H}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$\nabla \times H = \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \quad (2.2)$$

즉, z축 방향으로 전파하는 평면파이기 때문에,  $\frac{\partial}{\partial t}$  및  $\frac{\partial}{\partial z}$  이외는 0(zero)

인 것을 고려하면, 식 (2.1)은 다음의 두 개의 스칼라 방정식으로 분해될 수 있다.

$$\frac{\partial E_y}{\partial z} = \mu_0 \frac{\partial H_x}{\partial t} \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial z} = -\mu_0 \frac{\partial H_y}{\partial t} \quad (2.4)$$

같은 방법으로 식 (2.2)에 관해서도 다음의 두 개의 스칼라 방정식이 얻어진다.

$$-\frac{\partial H_y}{\partial z} = \varepsilon_0 \frac{\partial E_x}{\partial t} \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial H_x}{\partial z} = \varepsilon_0 \frac{\partial E_y}{\partial t} \quad (2.6)$$

여기서,  $\varepsilon_0$ 와  $\mu_0$ 는 각각 자유공간의 유전율과 투자율이다.

이 식 (2.3)과 식 (2.6)으로부터  $H_x$  및 식 (2.4)과 식 (2.5)로부터  $E_x$ 를 각각 소거하고  $E_y$  및  $H_y$ 에 관한 1차원의 파동방정식 식 (2.7)을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial z^2} = \mu_0 \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial H_x}{\partial t} = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2} \quad (2.7)$$

여기서, 가령  $E_y$ 에 관한 파동방정식 (2.7)의 해를 구하면 전계  $E_y$ 가 구해진다.

즉, 시간인자를  $e^{j\omega t}$ 라 하고, 이것을 식 (2.7)에 대입하면  $E_y$ 에 관해 2개의 선형 미분방정식을 얻는다. 이 해는 다음과 같이 진행파  $E_+ e^{-\gamma_0 z}$ 와 후진파  $E_- e^{\gamma_0 z}$ 의 선형결합으로서 나타낼 수 있지만, 여기에는 그림 2.2(a)와 같이 +z 방향으로 전파하는 파를 고려하고 있기 때문에, 진행파( $E_+ e^{-\gamma_0 z}$ )만을 선택한다. 또,  $\gamma_0 = j\omega \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}$ 라 놓으면

$$E_y = (E_+ e^{-\gamma_0 z} + E_- e^{\gamma_0 z}) e^{j\omega t} \quad (2.8)$$

이 된다. 이  $E_y$ 성분을 식 (2.3)에 대입하면  $H_x$ 성분도 다음과 같이 도출될 수 있다.

$$H_x = -\frac{\gamma_0}{j\mu_0\omega} E_+ e^{-\gamma_0 z} e^{j\omega t} = -H_+ e^{-\gamma_0 z} e^{j\omega t} \quad (2.9)$$

더욱이, 이러한 평면파의 전계성분과 자계성분에 관해서, 그 방향도 고려하여 비를 구하면 일정한 값이 된다. 자유공간에서 이 값은 약 375.7  $\Omega$ 이 되고, 파동임피던스라 불리워진다.

$$Z_0 = \frac{E_y}{H_x} = \frac{j\mu_0\omega}{\gamma_0} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \quad (2.10)$$

같은 방법에 따라  $H_y$ 에 관한 1차원의 파동방정식도 해석이 가능하고, 이렇게 하면 그림 2.2(b)에 나타낸  $H_y$ 와  $E_x$ 성분을 가지는 평면파에 관해서도 해를 구할 수 있다.

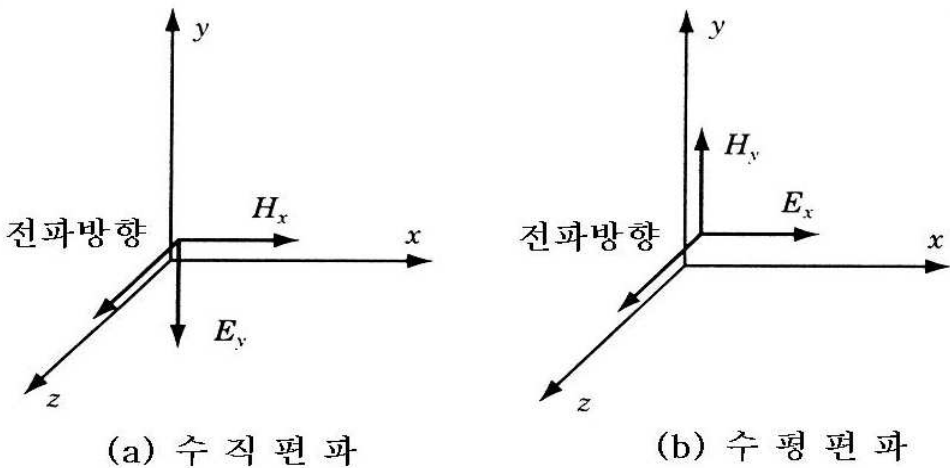


그림 2.2 평면파의 전자계성분

Fig. 2.2 Magnetic component of plane wave

## 2.2.2 에너지의 흡수원리

평면파가 자유공간을 전파하는 경우에는 거의 감쇠하지 않지만, 그림 2.3에서 보듯이 손실유전체나 손실자성체와 같은 매질을 전파하는 경우에는, 그 재료의 전기적 특성에 따라 크게 감쇠한다. 즉, 손실 매질에서는 유전율 및 투자율  $\dot{\epsilon} = \epsilon' - j\epsilon''$  및  $\dot{\mu} = \mu' - j\mu''$ 이 복소수가 되고, 또 도전율  $\sigma$ 가 유한한 값을 가지고 있기 때문에, 맥스웰방정식은 식 (2.3) ~ 식 (2.6)에 대응해서 다음과 같은 스칼라 방정식으로 분해할 수 있다.

$$\frac{\partial E_y}{\partial z} = \dot{\mu} \frac{\partial H_x}{\partial t} \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial z} = \dot{\mu} \frac{\partial H_y}{\partial t} \quad (2.12)$$

$$-\frac{\partial H_y}{\partial z} = \sigma E_x + \dot{\epsilon} \frac{\partial E_x}{\partial t} \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial H_x}{\partial z} = \sigma E_y + \dot{\epsilon} \frac{\partial E_y}{\partial t} \quad (2.14)$$

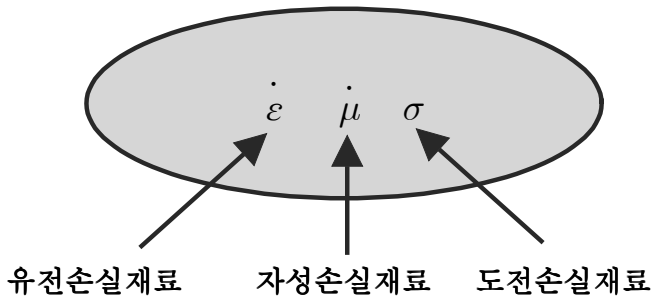


그림 2.3 손실매질

Fig. Loss material

일례로서 이 스칼라 방정식 (2.12) 및 식 (2.13)으로부터  $H_y$  성분을 소거하고, 이것으로부터 얻어지는 식 (2.15)의  $E_x$ 에 관한 파동방정식을 풀이하여 수평편파에 관한 전자파의 감쇠 상태를 알 수 있다.

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} = \sigma \dot{\mu} \frac{\partial E_x}{\partial t} + \epsilon \dot{\mu} \frac{\partial^2 E_x}{\partial t^2} \quad (2.15)$$

이를 위하여 다음의  $n^2 = \omega^2 \dot{\epsilon} \dot{\mu} - j\omega \sigma \dot{\mu} (= -\gamma^2)$ 라 두고, 또한 편의상  $n^2 = (\beta - j\alpha)^2$ 라고 복소수로 정의하면, 이 파동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} + n^2 E_x = 0 \quad (2.16)$$

여기서,  $\beta$  및  $\alpha$ 는 각각 위상정수 및 감쇠정수라 불리 우며, 전자파의 감쇠에는 이  $\alpha$ 가 크게 영향을 준다. 일례로서 앞에서 나타낸 바와 같이  $\dot{\epsilon}$ 과  $\dot{\mu}$ 가 모두 실수,  $\sigma$ 가 0인 경우에는  $\alpha$ 는 0이 되어 전자파는 감쇠하지 않는다. 또  $\dot{\epsilon} = \epsilon' - j\epsilon''$ ,  $\mu$ (실수) 및  $\sigma = 0$ 인 경우에는  $n^2$ 은 식 (2.17)이 된다.

$$n^2 = \omega^2 \epsilon \dot{\mu} \quad (2.17)$$

이것을  $\alpha$ 에 관해서 풀면 다음 식으로 나타내어지고,  $\epsilon''$  이 존재함으로써  $\alpha$ 는 유한의 값이 되어 전자파는 감쇠하게 된다.

$$\alpha = \sqrt{\frac{\omega^2 \epsilon' \mu}{2}} \left\{ \sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'}\right)^2} - 1 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2.18)$$

이상의 이론으로부터, 전자파는 손실매질 중에 있어서  $\epsilon''$ ,  $\mu''$  과  $\sigma$ 의 효과에 의해 감쇠하는 것을 알 수 있으며, 그 에너지는 열로 변환된다. 그리고 이 관점에서 전자파는 전파흡수체는 전자파의 감쇠(흡수)가 다음에 나타내는 어느 요인에 기인하는가에 따라 3종류로 분류되며, 또 이때의 단위 면적당의 전파흡수에너지  $P [W/m^2]$ 는 전계  $\mathbf{E}$ 와 자계  $\mathbf{H}$ 를 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{a) 유전손실 : } \epsilon'' \text{ 에 기인하는 것으로서 } \quad P = \frac{1}{2} \omega \epsilon'' |E|^2$$

$$\text{b) 자성손실 : } \mu'' \text{ 에 기인하는 것으로서 } \quad P = \frac{1}{2} \omega \mu'' |H|^2$$

$$\text{c) 도전손실 : } \sigma \text{ 에 기인하는 것으로서 } \quad P = \frac{1}{2} \sigma |E|^2$$

단, 고주파에 있어서는, 식 (2.19)에 나타내는 바와 같이  $\epsilon''$ 과  $\sigma$ 를 나누어서 설명할 수 없기 때문에, 어느 쪽의 손실이 지배적인지에 따라 도전성 손실재료가 되는지 유전 손실재료인지를 분류하고 있다.

$$\begin{aligned} n^2 &= \omega^2 \epsilon' \mu - j \omega^2 \mu \left( \epsilon'' + \frac{\sigma}{\omega} \right) \\ &= \omega^2 \epsilon' \mu - j \omega^2 \mu \epsilon_t \end{aligned} \quad (2.19)$$

여기서  $\epsilon_t = \epsilon'' + \frac{\sigma}{\omega}$  이다[12].

## 2.3 전파흡수체의 분류

### 2.3.1 전파흡수 재료에 의한 분류

전파흡수 재료로 사용되는 재료는 여러 종류가 있지만, 여기에서는 전술한 전파흡수 기구(원리)에 따라 다음과 같은 세 가지로 분류하여 설명한다.

#### (1) 도전손실재료

저항체에 전류를 흘리면 흐르는 전류에 의해 열이 발생한다. 이와 마찬가지로 유한한 도전을  $\sigma$ 를 가지는 매질에 전계가 가해지면 도전전류가 흘러서, 전자파 에너지는 열로 변환된다. 이 재료에서는 앞에서 나타낸 식 (2.19)의 관계가 성립하고, 고주파영역에 있어서도  $\epsilon''$ 이 극히 작은 유전손실재료라고 표현해도 좋다.

이와 같은 도전성 손실재료에는 도전성섬유를 부직포 형태로 짜서 만든 베나산화인듐 방울을 증착한 유전체 시트 등이 있다. 또, 이들은 저항피막이라 불리우며, 그 전기적 특성은 두께를 무시할 수 있는 정방형상의 저항으로서 면저항치( $\Omega/\square$ )로 표시된다.

#### (2) 유전손실재료

고주파영역에서는, 매질의 복소유전율의 허수부가 식 (2.19)에서와 같이  $\epsilon''$ 과  $\sigma$ 로 표현되며, 주파수가 높아질수록 이것들을 따로따로 논하는 것은 불가능하기 때문에 인가한 전계에 의해 생기는 유전분극에 의한 흡수와 도전전류에 의한 흡수를 합해서 표현한다. 그리고 이와 같은 흡수 재료로는 카본입자를 혼입한 고무시트, 그라파이트(흑연) 함유 발포 폴리스티로폼, 카본 함유 발포 우레탄 등이 있다. 특히 그라파이트 함유 발포 폴리스티로폼에 관해서는 그라파이트 함유량이나 주파수의 변화에 대한 복소유전율을 실험식으로 표현하고 있으며, 전파압실용의 광대역성을 가지는 다층형 전파흡수체에 사용되고 있다.



### (3) 자성손실재료

소결페라이트가 대표적인 것으로, 고무 등에 페라이트를 혼합한 고무 페라이트 등이 자성 전파흡수 재료이다. 복소비유전율의 허수부  $\mu''$ 가 전파흡수에 기여한다. 상기 (1), (2)의 재료와 달리 자계가 큰 장소에서 전파흡수가 크다. 그러나 전파흡수기구가 상기와는 다르므로 VHF대에서는 대단히 얇은 전파흡수체가 실현될 수 있는 것이 특징이다.

### 2.3.2 형태에 의한 분류

전파흡수체를 형태에 따라서 분류하면 그림 2.4처럼 4개로 분류된다. 이 중에서 흡수체의 형태를 파형(波形)과 산형(山形) 그리고 사각추형(四角錐形)으로 하는 것은 흡수특성을 광대역으로 하기 위해서이고, 평판형(平版形)에서는 다층화 하는 것에 따른 광대역 성능을 실현할 수 있다.

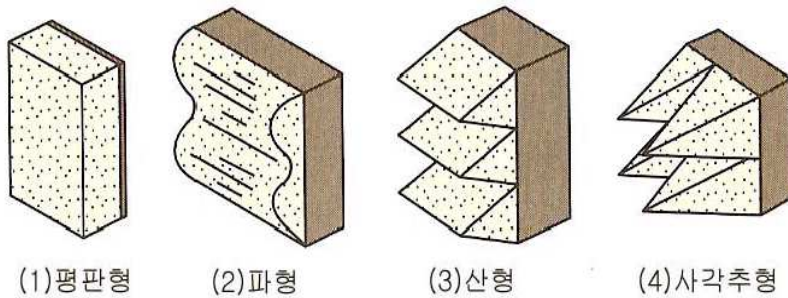


그림 2.4 형태에 의한 분류

Fig. 2.4 Classification by shape

### 2.3.3 층수에 의한 분류

전파흡수체를 층수로 분류하면 그림 2.5에 나타나는 바와 같이 단층형, 2층형 및 다층형으로 구분할 수 있다. 단층형과 2층형은 평판형에 속하고, 다층형은 파형, 산형이나 사각추형에 속한다. 각각의 특징을 살펴보면 다음과 같다.

### (1) 단층형 전파흡수체

전파흡수 재료가 한 장의 층으로 되어 있고, 보통 이면에는 알루미늄이나 철 판 등의 금속이 붙어 있다. 저항피막에 의한 형 전파흡수체나, 유전성 전파흡수 재료에 의한 단층형 전파흡수체는 일반적으로 주파수 대역폭이 좁은 협대역형 전파흡수특성을 나타낸다. 레이다 허상방지처럼 사용주파수가 한정된 경우(1개 주파수대에서 가능한 것)에 주로 사용된다. 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. 텔레비전 고스트방지처럼 2개의 주파수대역에서 흡수가 요구되거나, 실내 무선LAN처럼 양편파 대응(TE파와 TM파 또는 원편파)과 광각도 특성이 요구될 경우에 사용된다.

### (3) 다층형 전파흡수체

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

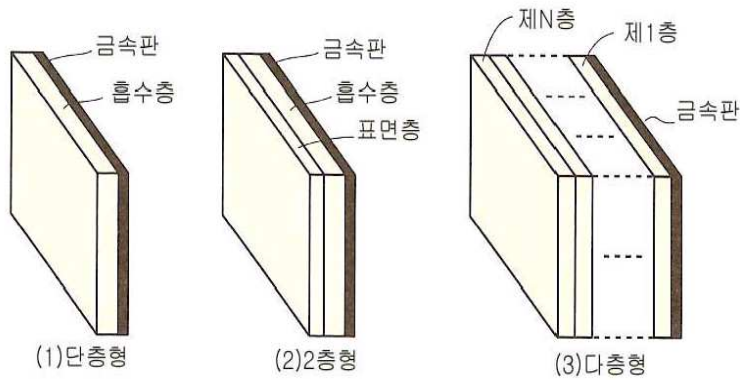


그림 2.5 층수에 의한 분류  
 Fig 2.5 Classification by layer

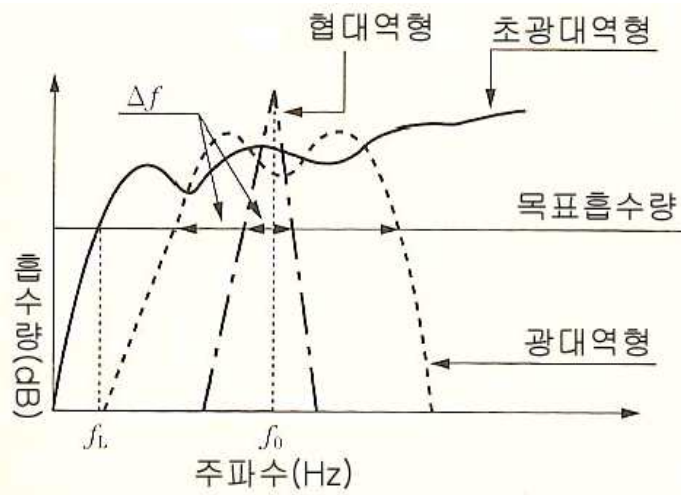


그림 2.6 주파수특성에 의한 분류  
 Fig 2.6 Classification by frequency characteristic

### 2.3.4 주파수 특성에 의한 분류

전파흡수체의 흡수특성을 생각할 때, 그림 2.6에서 나타내듯이 흡수량이 어떤 목표흡수량 보다 커지는 주파수  $f_L$  및  $f_H$ 를 초과하는

주파수대역,  $f_0$ 는 중심주파수)가 필요하다. 이들을 하한주파수 및 주파수 비대역폭 이라고 부른다. 이들로부터 협대역형, 광대역형, 초광대역형 전파흡수체로 분류된다.

### (1) 협대역형 전파흡수체

주파수 비대역폭  $\Delta f/f_0$ 가 약 10 %정도 이하, 또는 경우에 따라서 20 %이하의 전파흡수를 협대역형 전파흡수체라 한다. 레이더 주파수용 등 사용주파수대역폭이 좁은 경우에 이용된다. 이 협대역형 전파흡수체의 주파수 특성은 단봉특성을 나타내고, 주로 단층형 및 평판형 전파흡수체 구조이다.

### (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 및 평판형 구조로 하기도 한다. 또 소결페라이트 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 및 산형, 사각추형 전파흡수체에 의해서 실현된다[5],[13].

## 2.4 전파흡수체의 용도

전파의 이용은 주파수적으로 상당히 넓은 영역에 존재하고 있다. 그렇기 때문에 전파흡수체도 그것을 커버하기위해 여러 가지 주파수에 대응해서 실현되고, 또 현재도 연구 개발되고 있다. 전파흡수체를 실현하려고 하는 시험은 제 2차 세계대전 중, 레이더 탐색으로부터 비행기나 잠수함을 지키기 위한 수단으로 행해졌다. 그러나 현재는 전파이용의 현황도 MHz대뿐만 아니라 GHz대, 테라파대(30GHz대 이상)까지 급속히 진보하고 있어, 각각의 이용에 따른 특징적인 전파흡수체가 실현되고 있다. 전파흡수체의 구체적인 용도와 그 응용범위에 관하여 설명하고, 그것을 표 2.1과 표 2.2로 나타내었다.

### (1) 전파장애방지 대책용 전파흡수체

최근 그림 2.7에 나타내는 바와 같이 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 현실이다. 이들 방법 중에서 건축물의 벽면에 전파흡수체를 붙여 반사파를 적게 하는 방법은 장애를 일으키고 있는 원인을 직접 없앤다는 의미에서 뛰어난 대책법이며, 이미 각 방면에서 실용화되어 있다. 이들 전파흡수체는 주파수가 2개 파로 존재하고 있기 때문에 2층 구성이 많고 그 재료로서 일반 페라이트가 이용되어지고 있다.

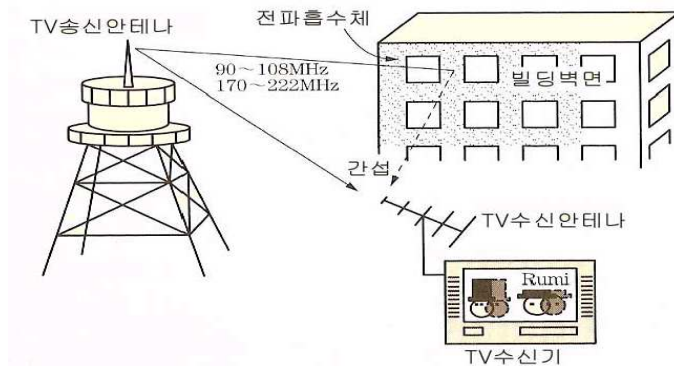


그림 2.7 TV 고스트의 발생 기구

Fig. 2.7 TV ghost generator

## (2) 레이더 허상방지 대책용 전파흡수체

레이더 허상(false echo)으로서는, 특히 선박의 마스트나 가시거리내의 교량으로부터의 반사에 의한 문제를 들 수 있다. 예를 들어 그림 2.8에서와 같이 최근 대형교량이 해상에 건설되었고, 이것에 의한 선박용 X-밴드 레이더(주파수 9.375 GHz)의 전파반사에 기인한 레이더의 허상 문제가 야기되고 있다.

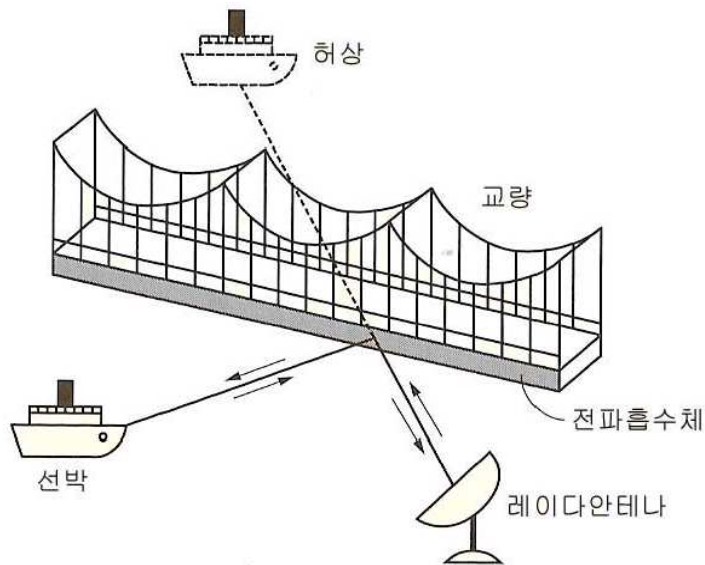


그림 2.8 레이더 허상의 발생기구

Fig. 2.8 Radar ghost generator

이 현상은 그림 2.8에 나타내는 바와 같이, 교량으로부터의 반사전파 때문에 선박이 없는 위치에 허상이 나타나거나, 위상관계에 따라서는 선박의 상(像)이 잘 보이지 않게 되는 것으로, 경우에 따라서는 사고의 원인이 된다. 이러한 경우에 이용되어지고 있는 흡수체는 해상에서 사용되고 있기 때문에 염해 등에 대해서 우수한 내구성이 요구된다. 또 흡수체 자체의 무게도 중요한 포인트이고, 협대역에서 특성이 좋은 페라이트계나 고무계의 단층형 흡수체가 실현되고 있다. 특히, 일본의 경우 혼슈-시코쿠(本州四國)연락교 공단에서는 이 레이더 전파장해대책을 검토하는 위원회가 설립되어, 그 성과로서 인노시마대교(因島大橋) 양측의 교량부재의 외면 약 560 m길이에 걸쳐 전파흡수체를 시공하였다[20].

### (3) 전파암실용 전파흡수체

전파암실은 실내의 벽면에 전파흡수체를 붙인 방으로, 내부에서 발생된 전파는 벽면에서 흡수되어 반사파가 생기지 않으므로 전파적으로 보면 무한공간과 등가가 된다. 따라서 종래부터 안테나의 지향성 실험 등의 목적을 위해서 건설되어 왔다. 그림 2.9에 실제 전파암실을 나타내었다. 이러한 장소에서 사용되고 있는 전파흡수체에서는 초광대역성을 가지는 것을 사용해서, 통상 일정의 주파수(하한주파수  $f_L$ )보다 높은 주파수에서는 전파를 흡수하는 특성이 요구된다. 더욱이 최근의 전자파환경문제를 위해, 각종 전자기기로부터의 방사전자파 평가시험을 위한 전파암실이나 밀리미터파대의 연구개발에 맞추어, 그 범위가 밀리미터파대까지 사용 가능한 전파암실이 시공되고 있다.

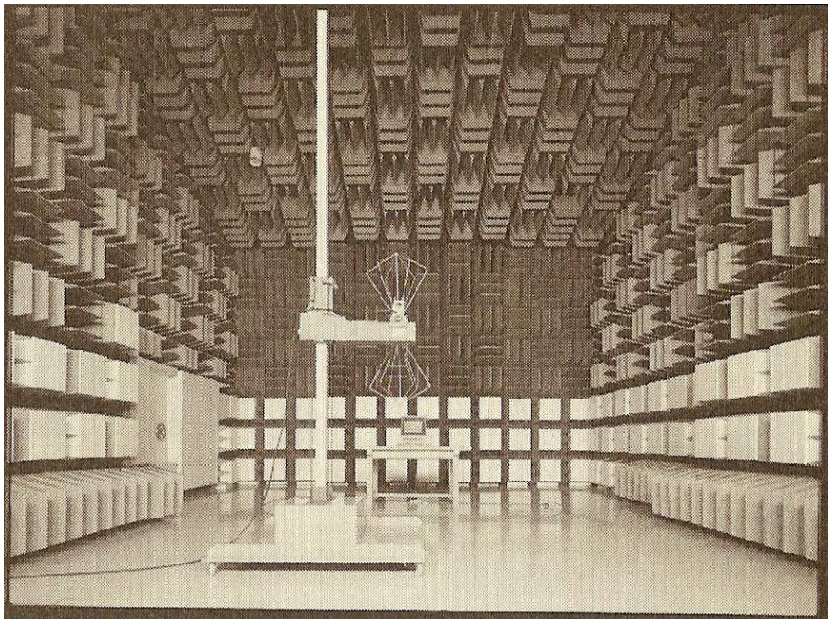


그림 2.9 전파암실의 내부

Fig. 2.9 Inside view of anechoic chamber



#### (4) 밀리미터파대용 전파흡수체

최근 레이더나 통신기 등의 사용 주파수도 밀리미터파대의 높은 영역으로 옮겨가고 있으며, 그에 따라 밀리미터파대에 대한 전파흡수체의 필요성도 높아져 가고 있다. 이러한 배경에서 밀리미터파 전파흡수체의 연구도 활발해져서 35 GHz대나 60 GHz대, 나아가서 94 GHz대용 고무시트계 전파흡수체나 저항피막형 전파흡수체의 연구가 진행되고 있다. 현재 실내무선 LAN은 2.4 GHz대가 이용되고 있지만, 장래적으로는 구내 데이터 전송으로 19 GHz대, 실내무선 LAN으로서 5 GHz대나 60 GHz대의 이용이 검토되고 있고, 현재연구가 진행되고 있다. 한 예로서 사무실이나 공장 등의 실내에서의 밀리미터파를 이용한 무선 LAN(Wireless Local Area Network)의 실내 이미지를 그림 2.10에 나타낸다. 이 경우 밀리미터파 전파흡수체를 천정이나 바닥의 벽면에 장착하여, 전파가 이들로부터 다중 반사하는 것을 막아, 정보전달의 오류율(error rate)을 적게 하고 있다. 또 사용될 장소는 창처럼 투명한 장소도 있고, 요구되는 흡수특성 이외의 첨가특성으로서 투명성이나 주파수 선택성 등이 필요하다. 또한 최근 전자파의 인체에 대한 영향에 관해서 우려하는 목소리가 높아지고 있다. 이러한 배경에서 인체의 전파흡수율(SAR ; Specific Absorption Rate)을 규명하는 연구가 행해지고 있으며, 이러한 분야에 있어서도 전파흡수체의 역할은 중요해져 왔다[12].

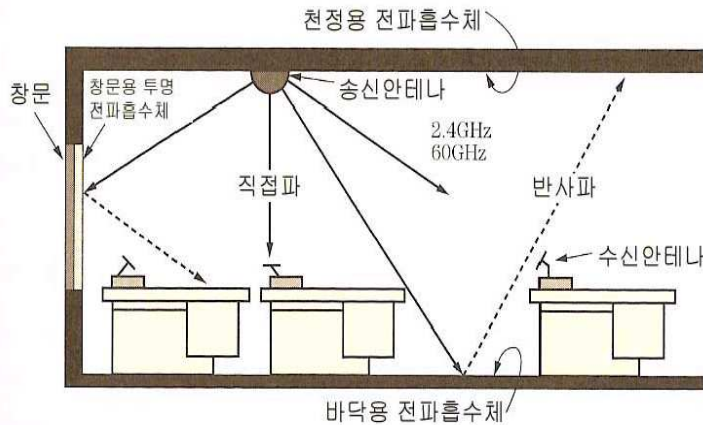


그림 2.10 무선 LAN의 실내 이미지

Fig. 2.10 Inside image of wireless LAN



(5) ITS(Intelligent Transport System)용 전파흡수체

ITS의 중요기술로서 ETC(Electric Toll Collection)시스템이나 자동차레이더가 실용화되고 있다. 이 시스템의 대부분은, 여러 주파수대에 걸친 전파를 사용하고 있기 때문에 보다 좋은 상황에서 오동작을 방지하기 위해 전파흡수체가 사용된다. 예로, ETC시스템에 있어서는 그림 2.11처럼 요금소 근처의 전파환경 개선이나, 그림 2.12처럼 자동차 레이더에서 오류에 의한 허상방지대책이나 터널 내에서의 위치 오인방지 개선을 위해 이용이 검토되고 있다. 이러한 목적에서의 전파흡수체는 옥외에서 사용되고 있기 때문에 한냉지등에서 사용되는 경우도 상정한 우수한 내 환경성이 요구된다. 또 ETC시스템의 이용에는 흡수특성으로서 광각도 특성이나 양편파 특성(원편파 특성) 등도 요구된다[24].



그림 2.11 ETC시스템의 응용

Fig. 2.11 Application of absorber to ETC system

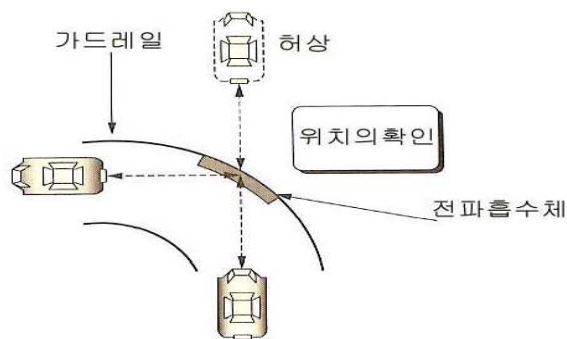


그림 2.12 자동차레이다에 응용

Fig. 2.12 Application of absorber to car radar

표 2.1 전파흡수체의 용도와 구체적인 예

Table 2.1 Application of EM wave absorber and specific examples.

용 도	구체적인 예
레이다 허상방지 대책	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 선박레이더의 허상방지 선박마스트, 교량 등</li> <li>• 항공관제레이더의 허상방지 건축물(격납창고), 교량등</li> </ul>
전파장해 방지대책	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 텔레비전 고스트 방지대책 건축물 등</li> <li>• 이동무선 장해대책 실내, 열차 등</li> </ul>
전파무향실(암실)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• EMC측정용 전파암실</li> <li>• 마이크로파용 전파흡수체</li> <li>• 밀리미터파용 전파흡수체</li> </ul>

표 2.2 전파흡수체의 종류

Table 2.2 The kind of EM wave absorbers.

응용 범위	전파흡수체의 종류
레이다 허상방지 대책용 전파흡수체	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 고무-페라이트계 전파흡수체</li> <li>• 고무-카본계 전파흡수체</li> <li>• 저항섬유계 전파흡수체</li> <li>• 금속섬유, 페라이트 다층형 전파흡수체</li> <li>• FRP계 전파흡수체</li> </ul>
전파장해방지 대책용 전파흡수체	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 페라이트계 전파흡수체</li> <li>• 저항섬유계 전파흡수체</li> <li>• 저항피막계 밀리미터파 전파흡수체</li> </ul>
전파암실용 전파흡수체	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 페라이트·카본계 다층형 전파흡수체</li> <li>• 카본계 피라미드형 전파흡수체</li> <li>• 페라이트·저항필름 다층형 판상재 전파흡수체</li> </ul>

## 2.5 정합조건

### 2.5.1 단층형 전파흡수체

두께  $d$ 의 전파흡수체를 판상으로 하여 금속판 위에 놓은 경우, 평면파의 수직입사에 대한 파동임피던스  $z$ 는 진공중의 평면파 파동임피던스로 정규화 하여 식 (2.20)과같이 주어진다.

$$\hat{z} = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tanh\left(j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon_r \mu_r} d\right) \quad (2.20)$$

여기서  $\lambda$ 는 입사한 평면파의 진공중의 파장이며,  $\epsilon_r$ 은 비유전율( $\epsilon/\epsilon_0$ ),  $\mu_r$ 은 비투자율( $\mu/\mu_0$ )이다. 또 반사계수  $S = \frac{\hat{z}-1}{\hat{z}+1}$ 이므로, 완전한 전파흡수체로 되기 위한 조건은  $S=0$ 으로부터  $\hat{z}$ 가 1이 되는 것이다. 즉, 전파흡수체의 완전정합 조건은 식 (2.21)과 같다.

$$\sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tanh\left(j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon_r \mu_r} d\right) = 1 \quad (2.21)$$

(1) 비자성 재료(유전체재료)의 경우

비자성 재료란 자석에 붙지 않는 것으로서,  $\mu = \mu_0$ (진공상태) 즉,  $\mu_r = 1$ 인 재료를 말한다. 예를 들면 나무, 종이, 고무, 플라스틱, 탄소, 우레탄 등이 여기에 포함된다. 따라서 식 (2.21)의 비투자율  $\mu_r$ 을 1로 두면 식 (2.22)과 같이 된다.

$$1 = \sqrt{\frac{1}{\epsilon_r}} \tanh\left(j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon_r} d\right) \quad (2.22)$$

여기서  $\varepsilon_r = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r''$ 라 두고, 변수  $\varepsilon_r'$ ,  $\varepsilon_r''$ ,  $d/\lambda$ 로 하여 식의 해를 구한다. 하지만 현재의 재료과학은  $\varepsilon_r = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r''$ 에서  $\varepsilon_r'$ ,  $\varepsilon_r''$ 을 자유롭게 조절하며 설계하는 데까지 이르지 않고 있다.

(2) 자성 재료의 경우

$$\sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}} \tanh\left(j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\varepsilon_r \mu_r} d\right) = 1 \quad (2.23)$$

비자성 재료에서는  $\mu_r = 1$ 로 했지만, 자성 재료의 경우는  $\mu_r$ 도 여러 가지 값을 가지므로 변수가 많다. 즉  $\varepsilon_r (= \varepsilon_r' - j\varepsilon_r'')$ ,  $\mu_r (= \mu_r' - j\mu_r'')$  및  $d/\lambda$ 의 5개 변수가 있다.

식 (2.23)을 고쳐 쓰면

$$\begin{aligned} -j\omega \cdot \tanh\omega &= \varepsilon_r \frac{2\pi}{\lambda} d \\ \omega &= j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\varepsilon_r \mu_r} d \end{aligned} \quad (2.24)$$

식 (2.24)의 관계를 만족하는 재료( $\mu_r$ ,  $\varepsilon_r$ ,  $d$ )가 있으면 전파함수체는 가능하나 목표는  $d \ll \lambda$ 의 조건하에서 식 (2.24)를 만족시켜야 하는 것이다.  $d \ll \lambda$ 의 경우 식 (2.24)에서  $\omega$ 의 절대치  $|\omega|$ 는  $|\varepsilon_r \mu_r|$ 로 큰 경우와 작은 경우가 고려된다.

(1) 근사해

$\omega \ll 1$ 인 경우,  $\tanh\omega \approx \omega$ 로 놓을 수 있으며, 식 (2.23)을 다음과 같이 변형할 수 있다.

$$1 = \sqrt{\frac{1}{\epsilon_r}} \left( j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon_r \mu_r} d \right) = j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\mu_r} d \quad (2.25)$$

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

$$1 = \frac{2\pi}{\lambda} \mu_r'' d + j \frac{2\pi}{\lambda} \mu_r' d \quad (2.26)$$

식 (2.26)로부터  $\mu_r' = 0$ ,  $\mu_r' \gg 1$ 인 재료에서 파장  $\lambda$ 의 전파를 흡수하기 위해 필요한 두께  $d$ 는

$$d = \frac{\lambda}{2\pi\mu_r} \quad (2.27)$$

가 된다.

페라이트재의  $\mu_r$ 의 주파수 특성은 공명주파수  $f_r$ 보다 높은 주파수대에서는 상기 정합 조건을 근사적으로 만족할 수 있다. 이 경우 두께  $d$ 에 재료의 유전율  $\epsilon_r$ 이 관계하지 않는 것은  $d \ll \lambda$ 이며, 재료는 금속판에 부착되어 있으므로 재료의 내부에서 자계는 크지만 전계는 매우 약하기 때문이다. 따라서 전계에 동작하는  $\epsilon_r$  효과는 나타나지 않는 것이다[17].

(2) 엄밀해

$\omega \ll 1$ 이 만족되지 않는 경우  $d \ll \lambda$ 라도  $\sqrt{\epsilon_r \mu_r}$ 이 큰 경우에는 반드시  $\omega \ll 1$ 이 만족되지 않는다. 자성손실재료, 즉  $\mu_r''$ 의 재료를 사용하는 경우에는 유전율  $\epsilon_r (= \epsilon_r' - j\epsilon_r'')$ 을  $\epsilon_r'' = 0$ 로 해도 좋다. 즉 유전율에는 손실항이 없고 투자율 쪽에만 손실항이 있다.  $f\lambda = C$  ( $C$ 는 진공중의 광속),  $\mu_r = \mu_r' - j\mu_r''$ 이라 하면 식 (2.23)은 다음과 같다.

$$1 = \frac{\sqrt{\mu_r'' - j\mu_r'''}}{\varepsilon_r} \tanh\left(j \frac{2\pi}{C} \sqrt{\varepsilon_r'(\mu_r' - j\mu_r''')} f d\right) \quad (2.28)$$

이 식은  $\varepsilon_r''$  및  $f_d$ 를 매개 변수로 하여 주어진  $\varepsilon_r''$ 에 대한  $f_d$ 를 지정하고 그때에 필요로 하는  $\mu_r$ 을 구한다.

이러한 조작으로 주어진 재료가 어떤 주파수에서 어느 두께일 때에 전파흡수체로 되는가가 구해진다. 페라이트의  $\mu_r$ 은 공명주파수  $f_r$ 보다 높은 주파수 범위에서는 변화의 양이 크므로, 주파수에 의한  $\varepsilon_r''$ 의 변화가 거의 없는 통상의 유전체와 같이  $d/\lambda$ 를 결정해서 하나의 변수로 취급할 수가 없다. 또, 페라이트 전파흡수체는 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  $d$ 와 전파의 파장  $\lambda$ 의 비만이 결정되는 것이다. 따라서 각종 파장의 전파에 대해서 재료의 두께  $d$ 를 변환시키면 무반사 조건을 만족시킬 수 있다. 하지만 페라이트와 같이  $\mu_r$ 이 주파수에 따라 크게 변화하는 경우에는 정합주파수가 모두 각각 유일하게 정해진다[8][18].

## 2.5.2 다층형 전파흡수체

페라이트 전파흡수체를 광대역하기 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 2.13은 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 미분방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{dZ_x}{dx} = j \frac{2\pi}{\lambda} (1 - \epsilon_{r,x} Z_x^2) \quad (2.29)$$

여기서,  $\lambda$  : 입사파의 파장

$\epsilon_{r,x}$  :  $x$  에 있어서의 매질의 복소유전율

이라 하고 투자율에 대해서는 자유공간중의  $\mu_0$ 가 매체 중에서도 변화하지 않는 것으로 한다. 또 전파흡수체 표면에서의 규격화 입력임피던스를  $Z$ 라 하면, 이 점에 있어서의 반사계수  $S$ 는 식 (2.30)와 같다.

$$S = \frac{\hat{z} - 1}{\hat{z} + 1} \quad (2.30)$$

따라서, 흡수체가 무반사로 되기 위한 조건은  $Z=1$ 이다. 그러나 이것을 완전히 실현하는 것은 어려우므로 허용 반사계수를  $S_0$ 라 했을 때, 실용 정합조건은 다음 식 (2.31)과 같은 식이 된다.

$$\frac{\hat{z} - 1}{\hat{z} + 1} \leq |S_0| \quad (2.31)$$

따라서 식 (2.31)을 조건으로 하여 식 (2.29)를 풀어서  $Z_x$ 를 구하면 된다. 그러나 식 (2.29)는 Riccati의 비선형 미분방정식으로 범함수이므로 해석적 방법으로 해를 구하는 것은 어렵다. 그래서 금속판 표면으로부터 거리  $x$ 에 대한 임피던스의 분포를 각각 가정하고, 그때의 반사계수의 주파수 특성을 계산하여 최적의 임피던스 분포를 찾는 방법이 사용되고 있다. 여기서  $|S_0| < 0.1$ 인 경우, 필요한 두께의 최소치는  $1/\lambda = 0.35$ 정도이며 이때  $\epsilon_{r,x}$ 의 값은 식 (2.32)와 같이 된다.

$$\varepsilon_{r,x} = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r'' = 1 - j \left[ \frac{3.9(1-x)}{1} - 0.9 \right] \quad (2.32)$$

그러나, 실제 이와 같은  $\varepsilon_{r,x}$ 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. 단수를 증가시키면 그림 2.13의 연속분포형에 접근하지만, 실용적으로는 가능한 한 단수를 적게 하고, 또 전체의 두께를 얇게 해서 원하는 특성을 얻을 필요가 있다.

## (2) 자성재료를 이용한 광대역 전파흡수체

30 ~ 1,000 MHz 정도의 주파수 범위에서 사용할 전파흡수체를 유전성 손실재료로 구성하려고 하면 전파흡수체의 두께가 매우 두꺼워지게 되어 실용적이 못하다. 즉, 이러한 전파흡수체는 허용 정재파비를 1.1로 할 때 사용최저주파수의 파장  $\lambda$ 에 대해서, 전파흡수체의 두께는  $0.6\lambda_d$ 로 되므로 100 MHz 정도의 주파수대에서 사용할 전파흡수체의 두께는 1.8 m나 된다. 그러나 자성재료인 페라이트를 이용하면 30 ~ 1,000 MHz 정도의 비교적 낮은 주파수대에서도 박층으로 광대역 특성을 만족시킬 수 있다. 이것은 페라이트의 투자율이 주파수 의존성이 크다는 점을 이용한 것으로, 두께 8 mm 정도에서 100 % 전후의 비대역폭이 얻어진다. 통상 페라이트 전파흡수체를 광대역화 하기 위해서는 여러 장의 페라이트 판을 간격을 두고 배치하는 다층 분리형이 유효하다.



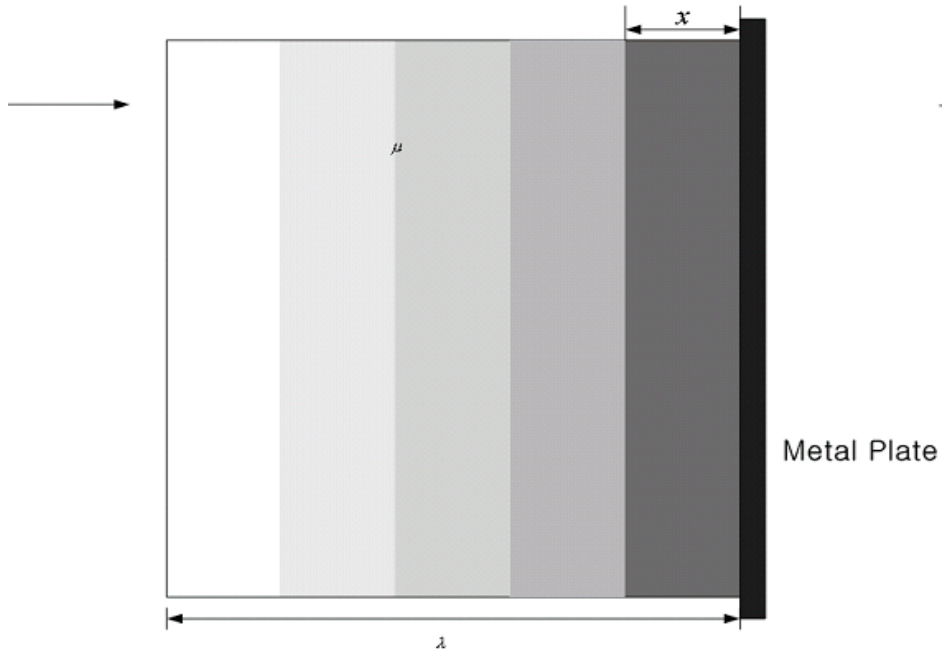


그림 2.13 광대역 전파흡수체

Fig. 2.13 Wide-band electromagnetic wave absorber

### 2.5.3 광대역형 전파흡수체

#### (1) 광대역화 전파흡수체의 기본식

그림 2.14과 같이 전파흡수체의 뒤에 금속판을 부착하고, 그 전면에  $n$ 개 층의 전파흡수체를 적층한 경우, 제  $n$ 층의 두께를  $d_n$ , 비투자율을  $\mu_n$ , 비유전율을  $\epsilon_n$ 으로 했을 때 평면파가 흡수체 전면에서 수직으로 입사하면,  $n$ 층의 전면에서 우측을 보는 정규화 입력임피던스  $z_n$ 은 식 (2.33)과 같이 된다.

$$z_n = z_{cn} \frac{z_{n-1} + z_{cn} \tanh(\gamma_n d_n)}{z_{cn} + z_{n-1} + \tanh(\gamma_n d_n)} \quad (2.33)$$

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

여기서  $z_{cn}$ 은 제  $n$ 층의 특성임피던스,  $\gamma_n$ 은 전파정수로서 각각 다음과 같다.

$$z_{cn} = \sqrt{\mu_{rn}/\varepsilon_{rn}} \quad (2.34)$$

$$\gamma_n = j\omega \sqrt{\mu_{rn} \varepsilon_{rn}} \quad (2.35)$$

따라서 첫 번째 층에서의 정규화 입력임피던스는 다음 식 (2.36)과 같다.

$$z_1 = \sqrt{\frac{\mu_{r1}}{\varepsilon_{r1}}} \tanh\left(j\frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\varepsilon_{r1}\mu_{r1}} d_1\right) \quad (2.36)$$

$i$  번째 층에서의 정규화 입력임피던스는 다음 식 (2.37)과 같다.

$$z_i = \sqrt{\frac{\mu_{ri}}{\varepsilon_{ri}}} \frac{z_{i-1} + \sqrt{\frac{\mu_{ri}}{\varepsilon_{ri}}} \tanh\left(j\frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\mu_{ri}\varepsilon_{ri}} d_i\right)}{\sqrt{\frac{\mu_{ri}}{\varepsilon_{ri}}} + z_{i-1} \tanh\left(j\frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\mu_{ri}\varepsilon_{ri}} d_i\right)} \quad (2.37)$$

$n$  번째 층에서의 정규화 입력임피던스는 다음 식 (2.38)과 같다.

$$z_n = \sqrt{\frac{\mu_{rn}}{\varepsilon_{rn}}} \frac{z_{n-1} + \sqrt{\frac{\mu_{rn}}{\varepsilon_{rn}}} \tanh\left(j\frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\mu_{rn}\varepsilon_{rn}} d_n\right)}{\sqrt{\frac{\mu_{rn}}{\varepsilon_{rn}}} + z_{n-1} \tanh\left(j\frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\mu_{rn}\varepsilon_{rn}} d_n\right)} \quad (2.38)$$

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

$$S_n = \frac{z_n - 1}{z_n + 1} \quad (2.39)$$

과 같이 된다.

따라서, 허용반사계수를  $|S_0|$ 라고 했을 때,  $S_n = \frac{z_n - 1}{z_n + 1} \leq |S_0|$ 을 조건으로 하여 전체 두께를 최소로 하는 전파흡수체를 설계하면 된다. 식 (2.39)에 의하면 이미 재료 정수를 알고 있는 페라이트를 적층한 경우, 각 층의 두께를 적절하게 조절함으로써 전체 입력임피던스를 변화시킬 수 있음을 알 수가 있다. 따라서 이미 개발된 전파흡수체 위에 재료정수가 다른 흡수체 층을 추가함으로써 기존 단층 전파흡수체로 흡수할 수 없는 주파수대에서도 흡수특성이 뛰어난 전파흡수체를 설계하는 것이 가능하다[6][12].

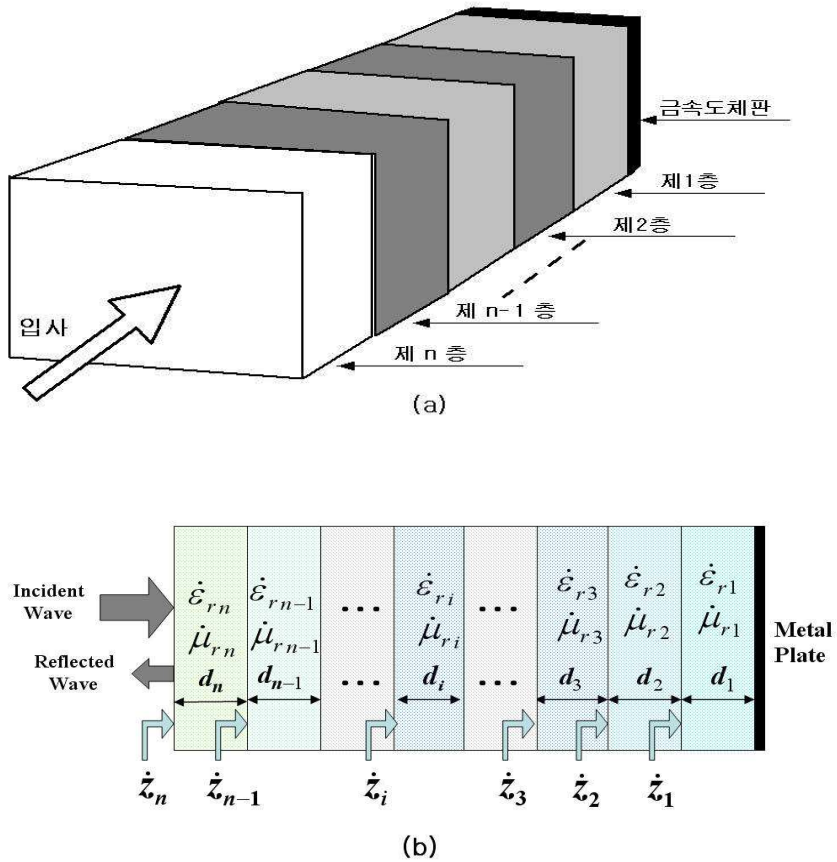


그림 2.14 다층형 전파흡수체 모델

Fig. 2.14 Multi-layered model for EM wave absorber

# 제 3 장 전파흡수체 설계 이론 및 측정법

## 3.1 전파흡수체의 분포정수회로화

### 3.1.1 파동방정식(Helmholtz Equation)

(1) 단순매질영역의 파동방정식

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

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (3.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (3.2)$$

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

전원분포가 없는 무손실 단순매질 이라면  $\sigma = 0$ 이므로 식(3.1) 양변에 회전  
을 취하여 식(3.2)를 대입하여 정리하면

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (3.3)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (3.4)$$

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

시간적 변화가  $e^{j\omega t}$ 인 시변장에서 매질의 전파정수(propagation constant)인

$\gamma$ 를 도입하여  $\omega^2 \mu \varepsilon = \gamma^2$ 로 놓으면 전계와 자계에 관한 파동방정식(Helmholtz equation)은

$$\nabla^2 \mathbf{E} + \omega^2 \mu \varepsilon \mathbf{E} = \nabla^2 \mathbf{E} + \gamma^2 \mathbf{E} = 0 \quad (3.5)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} + \omega^2 \mu \varepsilon \mathbf{H} = \nabla^2 \mathbf{H} + \gamma^2 \mathbf{H} = 0 \quad (3.6)$$

로 된다. 식(3.5)와 (3.6)은 동일한 형태의 방정식이므로 전계와 자계는 같은 형식의 해를 갖게 된다. 또한 식(3.1) ~ (3.4)에서 회전으로 인한 성분은 다음과 같고  $z$  방향 성분은 존재하지 않는다.

$$\frac{\partial E_y}{\partial z} = j\omega\mu H_x \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial H_x}{\partial z} = j\omega\varepsilon E_y \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial z} = -j\omega\mu H_y \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial z} = -j\omega\varepsilon E_x \quad (3.10)$$

식(3.7) ~ 식(3.10)을 고려하면 식(3.5)와 (3.6)은 다음과 같은 평면파의 파동방정식으로 되어

$$\nabla^2 E_x + \gamma^2 E_x = 0 \quad (3.11)$$

$$\nabla^2 H_y + \gamma^2 H_y = 0 \quad (3.12)$$

장(field)을 만드는 전원(source)  $\mathbf{J}$ ,  $\rho$ 의 분포가 없을 때 평면파에서 전자파가 진행해 나갈 때의 파동을 나타낸다. 식(3.11)과 (3.12)의 해를 지수함수 형태로 나타내면 다음과 같이 된다.

$$E_x = E^+ e^{-\gamma z} + E^- e^{\gamma z} \quad (3.13)$$

$$H_y = \frac{1}{Z_c} (E^+ e^{-\gamma z} - E^- e^{\gamma z}) \quad (3.14)$$

이것은 전파정수  $\gamma$ 가  $\mathbf{H}$ 에 직교할 뿐 아니라  $\mathbf{E}$ 에도 직교하는 것을 나타내고 또한 포인팅 벡터를 구해보면 전파정수  $\gamma$  방향으로 방사전력이 나가는 것을 의미한다. 전파흡수체에서는 이러한 방사전력이 반사 없이 흡수되어야 함을 전제로 한다.

평면파에서 방사전력 총량은  $Re(s)$ 에 수직인 전 평면에 걸쳐 적분함으로서 구할 수 있으나 무한평면이므로 방사전력의 총량도 무한대로 되어 실제적으로 평면파는 물리적으로 실현할 수 없는 파동이 된다. 미소 전류원에 의한 파동방정식의 해에 주목해보면 구면파는  $r^{-1}e^{-j\gamma r}$ 의 인자를 가지는데 포인팅 벡터로 방사전력총량을 구하면 유한치가 된다. 거리가 매우 큰 곳에서는 거리를 조금 변화시켜도 거리의 변화율은 극히 적다. 이것에 대하여  $e^{-j\gamma r}$  항은 거리의 미소 변화에도 민감하게 변한다. 따라서 전류원으로부터 멀리 떨어진 곳에서의 구면파를 부분적으로 조사 할 때는 수식적으로 간단하기 때문에 평면파로 취급할 수 있게 된다[16][19].

## (2) 분포정수회로의 파동방정식

다음으로 일반적인 전송선로의 분포정수회로에 대하여 생각해 본다. 높은 주파수대역에서 두 개 이상의 도체로 구성된 전력 전달 선로(Transmission Line)에서 길이 방향으로 그 특성이 일정한 선로는 특성 Impedance와 전파정수로 정의되며 이러한 선로는 분포정수회로로 해석된다. 여기서 R은 단위길이 당 저항성분( $\Omega/m$ )으로 도체의 불완전한 상태를 표시하며, L은 단위길이 당 인덕턴스(H/m), G는 단위길이 당 컨덕턴스 성분( $S/m$ )으로 유전체 손실여부를 의미하며, C는 단위길이 당 커패시턴스 성분 (F/m)을 의미한다.

마디 AB에서 KVL을 적용하고, 마디 BC에서 KCL을 적용하면

$$\frac{\partial v(t,z)}{\partial z} = - \left[ Ri(t,z) + L \frac{\partial i(t,z)}{\partial t} \right] \quad (3.15)$$

$$\frac{\partial i(t,z)}{\partial z} = - \left[ Gv(t,z) + C \frac{\partial v(t,z)}{\partial t} \right] \quad (3.16)$$

여기서  $z$ 는 선로를 진행하는 거리함수이다.

$R=0, G=0$ 인 무손실 전송선로(lossless line)에서 식(3.15)와 (3.16)의 페이지 표현은

$$\frac{dV(z)}{dz} = - (R + j\omega L)I = - Z_s I(z) \quad (3.17)$$

$$\frac{dI(z)}{dz} = - (G + j\omega C)V = - Y_p V(z) \quad (3.18)$$

여기서  $\gamma^2 = Z_s Y_p$ 의 복소전파정수(complex propagation constant)를 도입하면 식(3.17)과 (3.18)은

$$\frac{d^2 V(z)}{dz^2} = \gamma^2 V(z) \quad (3.19)$$

$$\frac{d^2 I(z)}{dz^2} = \gamma^2 I(z) \quad (3.20)$$

가 된다. 식(3.19)와 (3.20)에서 일반적인 2계 미분방정식의 해는 독립된 두개의 항을 가지므로 부하임피던스  $Z_L$ 을 전파함수체의 특성임피던스  $Z_C$ 로 하면

$$V(z) = V_i e^{-\gamma z} + V_r e^{+\gamma z} = V^+ + V^- \quad (3.21)$$

$$I(z) = \frac{1}{Z_C} (V_i e^{-\gamma z} - V_r e^{+\gamma z}) = \frac{1}{Z_C} (V^+ - V^-) \quad (3.22)$$

로 되어 평면파에서 식(3.13), (3.14)와 같은 형태가 된다.

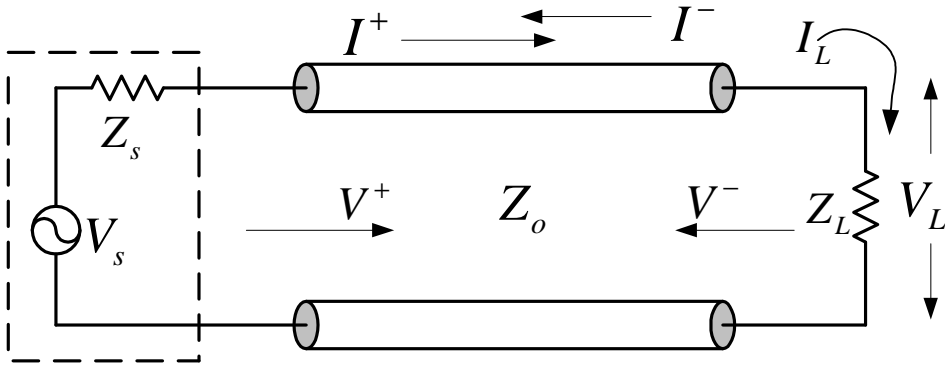


그림 3.1 일반적인 전송선로  
Fig. 3.1 General transmission line.

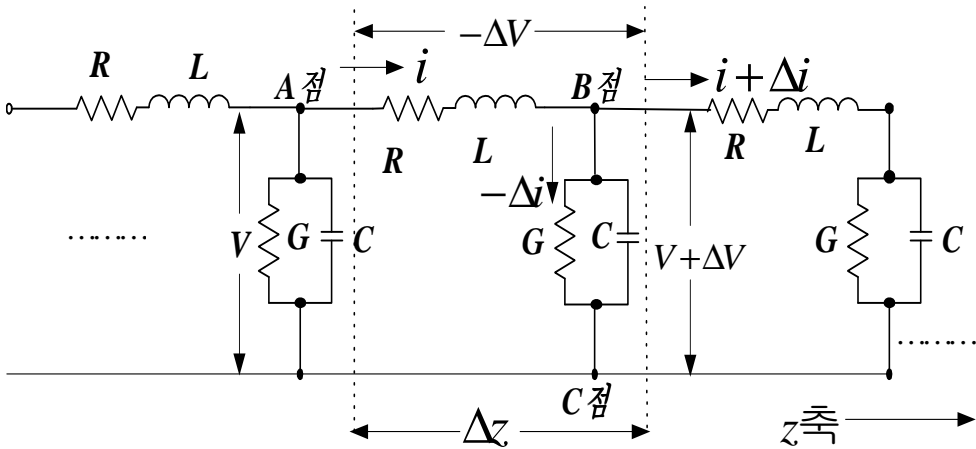


그림 3.2 일반적인 전송선로의 등가회로  
Fig. 3.2 Equivalent circuit of general transmission line



### 3.1.2 분포정수회로화

먼저 식(3.9)와 (3.10) 및 (3.17)과 (3.18)에서

$$\mu = \mu' - j\mu'' \quad (3.23)$$

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (3.24)$$

로 놓고  $R=0$ ,  $G=0$  인 무손실 전송선로(lossless transmission line)에서 분포정수회로의 기본식(3.9)와 (3.10)을 표현하면

$$\frac{dE_x}{dz} = -j\omega(\mu' - j\mu'')H_y = (-\omega\mu'' - j\omega\mu')H_y = -(\omega\mu'' + j\omega\mu')H_y \quad (3.25)$$

$$\frac{dH_y}{dz} = -j\omega(\varepsilon' - j\varepsilon'')E_x = (-j\omega\varepsilon' - \omega\varepsilon'')E_x = -(\omega\varepsilon'' + j\omega\varepsilon')E_x \quad (3.26)$$

$$\frac{dV(z)}{dz} = -(R + j\omega L)I = -Z_s I(z) \quad (3.27)$$

$$\frac{dI(z)}{dz} = -(G + j\omega C)V = -Y_p V(z) \quad (3.28)$$

이 되어 식(3.25) ~ (3.28)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

$$L \leftrightarrow \mu', \quad C \leftrightarrow \varepsilon', \quad R \leftrightarrow \omega\mu'', \quad G \leftrightarrow \omega\varepsilon'' \quad (3.29)$$

으로 되고, 이러한 대응관계를 분포정수회로의 전파정수에 적용하면

$$\gamma = \sqrt{ZY} = \sqrt{(R+j\omega L)(G+j\omega C)} = \sqrt{(\omega\mu'' + j\omega\mu')(\omega\varepsilon'' + j\omega\varepsilon')} = j\omega\sqrt{\varepsilon\mu} \quad (3.30)$$

이 되며, 또한 선로 특성임피던스는

$$Z_C = \sqrt{\frac{Z_S}{Y_P}} = \sqrt{\frac{R+j\omega L}{G+j\omega C}} = \sqrt{\frac{(\omega\mu'' + j\omega\mu')}{(\omega\varepsilon'' + j\omega\varepsilon')}} = \sqrt{\frac{\mu' - j\mu''}{\varepsilon' - j\varepsilon''}} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \quad (3.31)$$

$$Z_C = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} = \sqrt{\frac{\mu_o\mu_r}{\varepsilon_o\varepsilon_r}} \quad (3.32)$$

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

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

$$\varepsilon = \varepsilon_o \varepsilon_r = \varepsilon_o (\varepsilon' - j\varepsilon'') = \varepsilon_o \quad (3.33)$$

$$\mu = \mu_o \mu_r = \mu_o (\mu' - j\mu'') = \mu_o \quad (3.34)$$

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

$$Z_o = \sqrt{\frac{\mu_o}{\varepsilon_o}} = 120\pi \cong 377\Omega \quad (3.35)$$

식(3.32)를 식(3.35)로 정규화(normalization)시키면

$$z_c = \sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}} \quad (3.36)$$

로 소문자로 나타내기로 한다.

또한 진공중과 임의의 매질에서 전파정수는 각각

$$\gamma_0 = j\beta_0 = j\omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \quad (3.37)$$

$$\begin{aligned} \gamma &= \sqrt{ZY} = \sqrt{(R+j\omega L)(G+j\omega C)} = \sqrt{\omega\mu'' + j\omega\mu'}(\omega\epsilon'' + j\omega\epsilon') \\ &= \sqrt{j\omega(\mu' - j\mu'')j\omega(\epsilon' - j\epsilon'')} = j\omega \sqrt{(\mu' - j\mu'')(\epsilon' - j\epsilon'')} \\ &= j\omega \sqrt{\epsilon\mu} = j2\pi f \sqrt{\epsilon\mu} = j2\pi \frac{1}{\lambda \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \end{aligned} \quad (3.38)$$

로 되어 분포정수회로 상의 파라미터  $R, L, C, G$ 를 전자장 Parameter로 변환시킬 수 있다.

전기회로 내에서 전력을 소비하는 역할을 하는 것은 저항  $R$ 과 콘덕턴스  $G$ 이다. 유전율  $\epsilon (= \epsilon' - j\epsilon'')$ 과 투자율  $\mu (= \mu' - j\mu'')$ 에 주목하여 보면  $R$ 과  $G$ 에 대응하는 것은 각각의 복소성분  $\mu''$ 과  $\epsilon''$ 로서  $L$ 과  $C$ 는 무효손실이며  $R$ 과  $G$ 는 유효손실이 된다. 이것은 회로이론에서 무효전력과 유효전력의 벡터 합이 피상전력이 되는 것으로 이해할 수 있다. 많은 전파흡수체는 도체금속판의 앞에 적당한 얇은 재료를 한 장 또는 여러 장을 배치하여 만든다. 전자파의 입사 방향에서 보면 공기층과 전파흡수체 층으로 놓여진 것으로 된다. 여기에 사용된 재료정수는 투자율  $\mu$ 와 유전율  $\epsilon$ 을 가지고 있다. 이 들 재료정수를 식(3.29)에 적용하면 분포정수회로화 할 수 있다.

식(3.21)과 (3.22)에서  $V_i e^{-\gamma z}$ ,  $V_r e^{\gamma z}$ 는 각각 전원에서 부하방향 및 부하에서 전원방향으로 진행되는 파로서 부하측에서 보면, 전자는 입사파, 후자는 반사파가 된다.

반사파는 전자파가 진행되는 매질의 임피던스와 부하임피던스의 부정합에 의한 것으로 이 부분을 정합시킴으로서 반사파 성분을 제거 할 수 있고 전파흡수체 경우 전자파가 진행되는 매질의 임피던스와 전파흡수체의 임피던스를 정합시킨 것이라 할 수 있다.

식(3.21)과 (3.22)를 쌍곡선함수로 표현하여 분포정수회로 임의의 점  $d$ 에서 임피던스는

$$Z(d) = \frac{V(d)}{I(d)} = Z_c \frac{Z_L + Z_c \tanh \gamma d}{Z_c + Z_L \tanh \gamma d} \quad (3.39)$$

가 된다.

그림 3.3과 같은 전파흡수체 구조에서 흡수체 경계면에서 부하로 들여다보는 입력임피던스는 부하가 도체판으로 단락되어 있으므로  $Z_L = 0$  에서

$$Z_{in} = Z_C \tanh \gamma d \quad (3.40)$$

가 된다. 여기서  $d$  는 전파흡수체의 두께에 해당되며  $Z_C$  는 전파흡수체 특성임피던스이다. 따라서 식(3.38)~(3.40)에 식(3.30)~(3.32)를 적용하면 수전단에서 두께  $d$  떨어진 전파흡수체 표면에서의 임피던스는

$$Z_{in} = Z_C \tanh \gamma d = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \tanh(j\omega \sqrt{\epsilon\mu}) d \quad (3.41)$$

정규화(normalization)시키면

$$z_{in} = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tanh(j\omega \sqrt{\epsilon_r \mu_r}) d \quad (3.42)$$

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(3.21)과 (3.22)로부터 전압과 전류 반사계수(reflection coefficient)는

$$\Gamma_V(z) = \frac{V^- e^{-\gamma z}}{V^+ e^{\gamma z}} = \frac{V^-}{V^+} e^{-2\gamma z} \quad (3.43)$$

$$\Gamma_I(z) = \frac{-V^- e^{-\gamma z}/Z_o}{V^+ e^{\gamma z}/Z_o} = -\frac{V^-}{V^+} e^{-2\gamma z} = -\Gamma_V(z) \quad (3.44)$$

로 정의되고  $z=0$  에서는

$$\Gamma_V(0) = \frac{V^-}{V^+} = \frac{Z_L - 1}{Z_L + 1} \quad (3.45)$$

따라서 임의의 점  $x$  에서 부하단을 본 임피던스는

$$Z_{in} = \frac{V(x)}{I(x)} = Z_o \frac{1 + \Gamma(x)}{1 - \Gamma(x)} \quad (3.46)$$

정규화 시키면

$$z_{in} = \frac{Z_{in}(x)}{Z_o} = \frac{1 + \Gamma(x)}{1 - \Gamma(x)} \quad (3.47)$$

또 반사계수를 정규화 임피던스로 나타내면

$$\Gamma(x) = \frac{z_{in} - 1}{z_{in} + 1} \quad (3.48)$$

이 된다. 반사계수  $\Gamma$  는 0~1까지의 값을 갖는데 전파흡수체에서는  $\Gamma$  가 적을 수록 전파의 흡수능이 뛰어나나고 볼 수 있다. 가령  $\Gamma$  가 극단적으로 0이면 무

반사이므로 전자파 에너지의 완전 흡수가 일어나고  $\Gamma$  가 1이면 완전반사로 전파흡수는 일어나지 않는다[12][20].

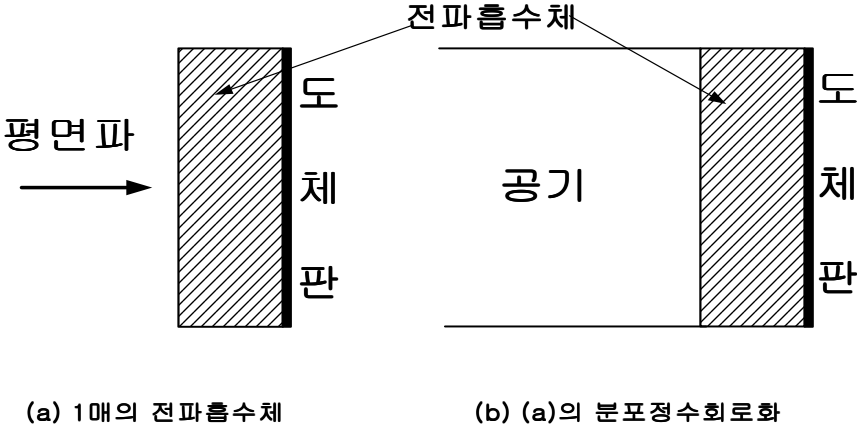


그림 3.3 전파흡수의 기본 구성  
 Fig. 3.3 Basic composition of a EM wave absorber.

### 3.2 전파흡수체 손실재료와 재료정수 측정법

#### 3.2.1 손실재료

##### (1) 전파흡수 재료의 종류

전파흡수 재료로는 여러 가지가 있으나 크게 나누면 도전성 전파흡수재료, 유전성 전파흡수재료, 자성 전파흡수 재료로 분류할 수 있다.

도전성 전파흡수 재료는 저항체(抵抗體), 저항선(抵抗線), 저항피막(抵抗皮膜)에 흐르는 도전전류에 따라 전파를 흡수하는 것으로 흡수에 필요한 적절한 저항치를 갖는 것이 중요하며 도전성 섬유 같은 식물로부터 양호한 전파흡수체가 얻어지고 있다.

유전성 손실재료로는 카본고무, 카본 함유 발포우레탄, 카본함유 발포 폴리에치렌 등과 같은 것들을 들 수 있고 광대역 특성을 얻기 위해 다층구조로 하고 있으며 이때 각층의 감쇠 특성은 매우 중요한 제어인자가 된다. 미국의 경우 피라미드형이 많으며 이것은 전파의 흡수 이외에도 여러 방향으로 전파를 산란시킨다.

자성 손실재료의 대표적인 것으로 페라이트가 있다. 금속판을 이면에 부착한 페라이트는 비교적 넓은 주파수대역에 걸쳐 양호한 흡수특성을 나타낸다. 정합 주파수는 재료에 따라 결정되지만 대체적으로 0.3~1.5GHz 대역에서 우수한 흡수특성을 나타내며 페라이트에 고무를 혼합하여 그 혼합비에 따라 정합주파수를 변화시키는 기법도 보고되고 있다.

전파손실을 가지는 재료의 유전율과 투자율은 복소수로서 그 복소유전율과 복소투자율은 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mu_r = \mu_r' - j\mu_r'' \quad (3.49)$$

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r'' \quad (3.50)$$

여기서 허수부는 손실항을 나타내며 만약 재료가  $\varepsilon_r'' = \mu_r'' = 0$  이면 무손실 재료가 되므로  $\varepsilon_r''$ ,  $\mu_r''$  둘 중 적어도 하나가 0이 되지 않는 경우에 전파흡수가 일어나지 않는다. 세 종류의 전파흡수 재료의 복소유전율과 복소투자율 관계를 표 3.2에 나타내었다. 표 3.2 에서처럼 자성 전파흡수 재료는 가해진 자계에 따라 전파흡수가 일어나고 복소비투자율의 허수부  $\mu_r''$  이 영이 되지 않는 경우이다. 이때 복소비유전율  $\varepsilon_r''$  는 0이 되거나 그렇지 않거나 관계없이 흡수가 일어난다. 재료 중에는 이렇게 자성손실과 같이 유전손실 또는 도전손실을 가지는 재료도 있다. 여기서 복소비유전율의 실수부가  $\mu_r' \neq 1$  인 것을 자성체라 부르고  $\mu_r'' = 0$  이면 무손실 자성체라 한다.

도전성 전파흡수 재료와 유전성 전파흡수 재료는 다같이  $\mu_r' = 1$ ,  $\mu_r'' = 0$  이다. 이 두 가지 흡수 재료의 차이점은 먼저 회로이론의 직류회로에서 옴의 법칙이 적용되는 저항을  $\rho [\Omega \cdot \text{m}]$  을 도입하여 높은 주파수에서도 도전전류는 흐르는 것으로 가정한다. 복소비유전율  $\varepsilon_r''$  과 저항을  $\rho [\Omega \cdot \text{m}]$  도전율  $\chi$  를 이용하여 나타내면

$$\varepsilon_r'' = \frac{1}{\omega \varepsilon_0 \rho} = \frac{\chi}{\omega \varepsilon_0} \quad (3.51)$$

이 된다. 사용주파수에 따라 이 식을 만족하는 재료 혹은 근사적으로 이 식에 가까운 재료를 도전성 전파흡수 재료라 부른다. 그러나 유전 손실체를 혼합한 재료는 이 식을 만족하지 않는데 그 이유는 이렇게 혼합한 재료에서는 저항체가 유전체 전체에 분산되기 때문이고, 그 등가회로는 복잡하게 된다. 따라서 직류에서는 전류가 흐르지 않기 때문에 저항율  $\rho$ 는 굉장히 크고 높은 주파수가 되면 정전용량으로 전류가 흘러 저항에도 전류가 흐르므로 전파손실이 크게 나타난다. 따라서 직류 저항율  $\rho$ 를 사용한 위의 식은 이와 같은 매질에서는 성립되지 않는다.

(2) 도전손  $\sigma$  · 유전체손  $\epsilon_r'''$  · 자성체손  $\mu_r''$

전파흡수체의 재료가 무손실( $R=G=0$ )이고, 부하가 도체판으로 단락되어 있다면 종단을 단락한 길이  $d$ 에서 정규화(normalization)임피던스는 식(3.40)으로부터

$$z_d = jR_c \tanh \beta d \quad (3.52)$$

로 순 허수 성분을 갖고 저항 성분은 0이 된다. 따라서 전기에너지를 소비, 또는 흡수하는 것은 불가능하다. 식(3.49)과 (3.50)에서 복소투자율과 복소유전율은 실수부와 허수부로 나누어진다. 이것은 식(3.31)과 (3.32)에서  $R \leftrightarrow \mu_r''$ ,  $G \leftrightarrow \epsilon_r''$ 에 대응하므로 흡수에 필요한 손실성분은  $\mu_r''$ ,  $\epsilon_r''$ 이다. 여기서 투자율  $\mu_r$ 는 식(3.49)과 (3.50)에서와 같이  $\mu_r = \mu_r' - j\mu_r''$  그대로 두고 유전율  $\epsilon_r$ 만  $\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r'''$ 로 두고 임의의 재료정수 조건에서 다음과 같이 맥스웰방정식에 대입하면

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu_r \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = -j\omega \mu_r \mathbf{H} = -j\omega(\mu_r' - j\mu_r'') \mathbf{H} \quad (3.53)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \epsilon_r \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \sigma \mathbf{E} + j\omega \epsilon_r \mathbf{E} = (\sigma + j\omega \epsilon_r) \mathbf{E} = j\omega \left( \epsilon_r - \frac{\sigma}{\omega} \right) \mathbf{E}$$



$$= j\omega \left[ \varepsilon_r' - j \left( \varepsilon_r''' + \frac{\sigma}{\omega} \right) \right] \mathbf{E} \quad (3.54)$$

이 된다.

식(3.53)의  $\mu_r''$  은 자성손실항을 나타내며 식(3.54)에서 도전율  $\sigma$ 를 고려한  $\varepsilon_r''$  은

$$\varepsilon_r'' = \varepsilon_r''' + \frac{\sigma}{\omega} \quad (3.55)$$

로 되어 도전손실항과 유전체손실항인  $\sigma$ 와  $\varepsilon_r'''$  로 나타낼 수 있다.

식(3.55)을 보면 복소유전율  $\varepsilon_r''$  는 순수한 유전손실만을 나타내는  $\varepsilon_r'''$  과 도전손실을 나타내는  $\sigma/\omega$  의 합으로 구성되어 그 재료가 가지는 고유의 허수항인  $\varepsilon_r'''$  과 재료의 도전율  $\sigma$ 를 높이면  $\varepsilon_r''$  가 증가하게 됨을 알 수 있다. 그러나 도전손실항  $\sigma/\omega$  은 주파수가 높아지면 그 값은 대단히 적어진다. 따라서 전자파의 에너지 손실은 도전손  $\sigma$ 와 유전체손실  $\varepsilon_r'''$  자성손실  $\mu_r''$  에 의하여 일어나며 전파흡수체는 이러한 재료정수  $\sigma$ ,  $\varepsilon_r''$ ,  $\mu_r''$  를 갖는 재료로 구성되어 진다.

따라서 이러한 재료를 얻기 위하여 도전손실  $\sigma$ , 유전손실  $\varepsilon_r'''$ , 자성체손실  $\mu_r''$  의 손실재료를 사용하거나 이러한 재료를 적당히 혼합하여 복합재료로 사용하는 방법들이 있다. 또한 각각의 재료를 기하학적인 배치로 공간적으로 달리 하는 법도 개발되고 있다.

(3) 전파흡수체 설계 시 고려사항

이상적인 전파흡수체는 어떠한 전파가 그것에 입사하여도 반사하지 않고 모든 전자파의 에너지를 흡수하는 것이어야 하지만 실제로 이러한 이상적인 전파흡수체를 만들어 내는 것은 현실적으로 많은 부분에서 특성이 제한된다.

이러한 전파흡수체를 실현하기 위해서는 몇 가지 고려하여야 할 사항이 있다. 어떤 매질의 파동 임피던스와 그 정규화 임피던스는

$$Z(d) = Z_c \tanh \gamma d = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \tanh (j\omega \sqrt{\epsilon\mu}) d \quad (3.56)$$

$$z(d) = z_c \tanh \gamma d = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tanh (j\omega \sqrt{\epsilon_r \mu_r}) d \quad (3.57)$$

로 표현되어 이것은 어떠한 주파수의 전자파에 대해서 자유공간의 파동 임피던스인  $377[\Omega]$ 이 되어야 완전한 흡수가 일어남을 의미한다. 그러나  $z(d)$ 는  $\omega$  함수(주파수함수)이므로  $\mu_r$ 와  $\epsilon_r$ 을 고정시켜 놓고 주파수가 변화하면  $z(d)$  값이 변하여 가변 주파수에 대해서 임피던스 정합이 곤란해지므로 전파흡수체 설계 시 흡수하려고 하는 주파수를 고려하여야 한다. 또한 자성체에서 비투자율  $\mu_r$ 는 입사 방향에 대해서 값이 분산되는 Tensor 형태로 전계와 자계의 입사 방향에 따라  $\mu_r$  값이 달라지게 되어 결국 파동 임피던스 값이 입사각에 대해서 변화하게 되므로 전계의 입사각에 대한 고려를 하여야 한다. 또 평면파에서 전계와 자계가  $z$  방향으로 수직하여 진행되는 경우 편파에 따라 전파흡수체의 특성이 달라지므로 전계의 방향도 염두에 두어야 한다.

따라서 전파흡수체의 설계는 어떠한 손실재료로 실현시킬 것이며 어떤 공간적인 구조로 만들 것인가 또한, 그러한 전파흡수체 설계에 따른 흡수체 사용주파수, 입사각, 편파의 세 가지 파라미터를 고려하여야 한다.

우선 공간적인 방법에서는 손실재료를 구조적으로 sheet상 또는 판상을 한층 또는 다층으로 중첩시키는 방법이 있다. 한 장의 층으로 되어 있는 단층형 전파흡수체는 흡수체 이면에 알루미늄이나 철판 등의 금속을 붙여 실현한다. 저항피막에 의한  $\lambda/4$ 형 전파흡수체나 유전성 전파흡수 재료에 의한 단층형 전파

흡수체는 일반적으로 비교적 좁은 협대역 전파흡수특성을 나타내는 반면 페라이트 타일의 경우는 비교적 넓은 주파수 특성을 나타낸다. 표 3.1에서 전파흡수체의 분류를 나타내었다[20].

단층형 전파흡수체를 보다 광대역화 하기 위하여 층수를 두 장으로 하는 2층형 전파흡수체는 이면 금속 층에서 전파를 흡수하고 전면 층은 공기 파동 임피던스로 정합하여 설계시키고 있다. 그 외에도 전파흡수체 층수를 다층화하여 광대역화한 다층형 전파흡수체는 주로 광대역 특성이 요구되는 전파무향실용으로 사용된다.

표 3.1 전파흡수체 분류

Table. 3.1 A classification of EM wave absorber.

구 분	종 류
재료에 의한 분류	도전성 전파흡수재료 유전성 전파흡수재료 자성 전파흡수재료
층수에 의한 분류	단층형 전파흡수체 2층형 전파흡수체 다층형 전파흡수체
외관에 의한 분류	평판형 전파흡수체 산형 전파흡수체 피라미드형 전파흡수체
주파수 특성에 의한 분류	협대역형 전파흡수체 광대역형 전파흡수체 초광대역형 전파흡수체

표 3.2 전파흡수체의 재료정수 조건

Table. 3.2 A material constants of EM wave absorber.

재 료	$\epsilon_r''$ 의 조건	$\mu_r' \mu_r''$ 의 조건
도전성 전파흡수재료	$\epsilon_r'' = 1/\omega \epsilon_0 \rho$	$\mu_r' = 1,$ $\mu_r'' = 0$
유전성 전파흡수재료	$\epsilon_r'' \neq 1/\omega \epsilon_0 \rho$	
자성 전파흡수재료	$\epsilon_r'' = 0$ 또는 $\epsilon_r'' \neq 0$	$\mu_r' = 1,$ $\mu_r'' \neq 0$

이러한 방법이외에도 손실재료를 기하학적으로 공간화 시키는 기법으로서 기본이 되는 평판형 전파흡수체로부터 흡수체 형상의 전면이 삼각형을 한 형상의 산형 전파흡수체와 피라미드 전파흡수체가 있다[16].

(4) 허용반사계수

전파흡수체에서 요구되는 특성은 주파수특성과 전파흡수체 두께와의 관계로 평가된다.

현실적으로 완전흡수조건을 충족하는 전파흡수체의 실현은 어려우므로 전파흡수체의 성능평가지수로 허용반사계수  $\Gamma$ 의 값을 설정하고 설계된 전파흡수체의 특성이 이 값을 만족할 때 허용하는 것으로 하고 있다.

전압에서 허용반사계수  $|\Gamma_v|$ 는 전력에서는  $|\Gamma_p|^2$ 이 되며 예를 들면 전압 허용반사계수가  $|\Gamma_v| = 0.1\%$  라면 전력 허용반사계수는  $|\Gamma_p|^2 = 1\%$ 가 되고 반사감쇄량은 dB로  $-20\log|\Gamma|^2$ 를 취하여 20 dB가 된다. 여기서 반사감쇄량을 20~30 dB에 주목해 보면 전력 허용반사계수량은 0.09 ~ 1%가 된다.

따라서 허용반사계수  $|\Gamma_v|$ 에 대하여  $|\Gamma| \leq |\Gamma_v|$ 를 만족하면서 전파흡수체의 두께를 경제적으로 되도록 얇게 또 주파수 대역폭을 넓게 하는 것이 필요하게 된다. 이러한 전파흡수체의 성능지수로서 협대역 전파흡수체에서는 어

편 주파수  $f_o$  부근의 대역폭  $B$ 를  $|Γ| \leq |Γ_o|$  를 만족시키는 조건하에 비대역폭  $F$ 는

$$F = \frac{\Delta f}{f_o} \quad (3.58)$$

가 되고, 광대역에서는 최저사용가능주파수  $f_L$ 에 대해서  $f \geq f_L$ 에서  $|Γ| \leq |Γ_o|$  를 만족시킬 때 진공 중 파장  $\lambda$ 로 나눈 값

$$F = \frac{d}{\lambda_L} \quad (3.59)$$

를 성능지수로 하여 이러한 비대역폭의 값들이 적을수록 전파흡수특성이 좋은 전파흡수체라고 한다.

협대역 전파흡수체는 그림 3.4(b)와 같이 주파수 비대역폭  $\Delta f/f_o$ 이 약 10% ~ 20%이하의 전파흡수능을 가지고 레이더와 같이 사용주파수 대역폭이 좁은 경우에 사용되며 주파수 특성은 단봉특성을 나타내고 주로 단층형 전파흡수체로 실현된다. 광대역형 전파흡수체는 사용주파수가 넓은 전파흡수체로서 협대역형과 구별은 명확하지 않으나 비대역폭  $\Delta f/f_o$ 의 20% ~ 30% 정도의 것으로 본다. 또한 초광대역형 전파흡수체는 그림 3.4(c)와 같이 어느 하한 주파수  $f_L$  이상의 주파수 전역에서 허용 반사계수 이하가 되는 특성을 갖는 전파흡수체를 말하며 주파수 비대역폭은 무한대로 보통 다층형 전파흡수체에 의해서 실현된다.

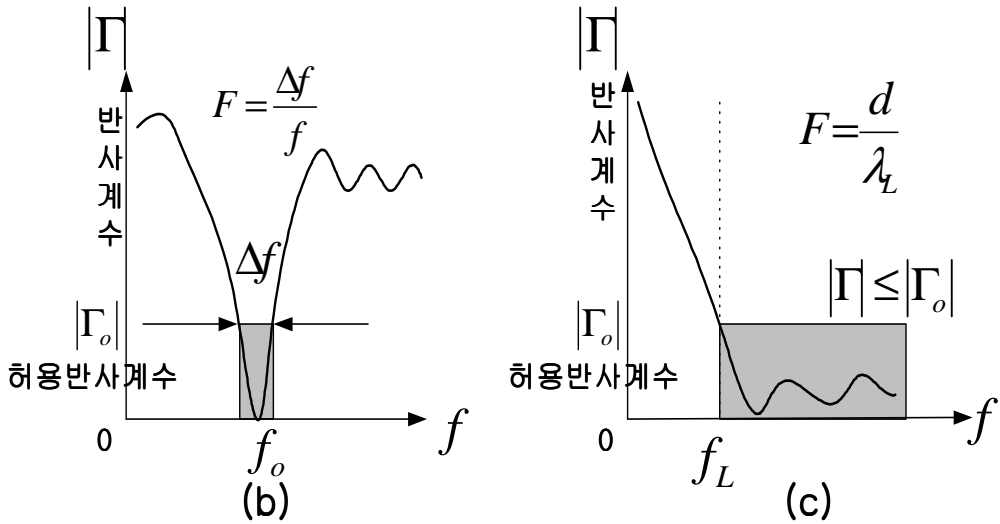
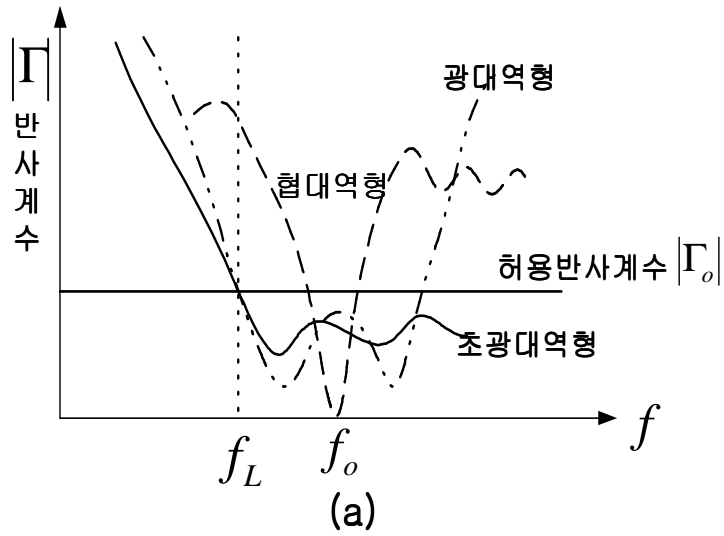


그림 3.4 전파흡수체 주파수 특성

Fig. 3.4 The frequency characteristic of EM wave absorber.

### 3.2.2 재료정수 측정법

#### (1) 개방 단락법



그림 3.5 시료를 삽입한 동축선로

Fig. 3.5 The coaxial line inserted EM wave absorber.

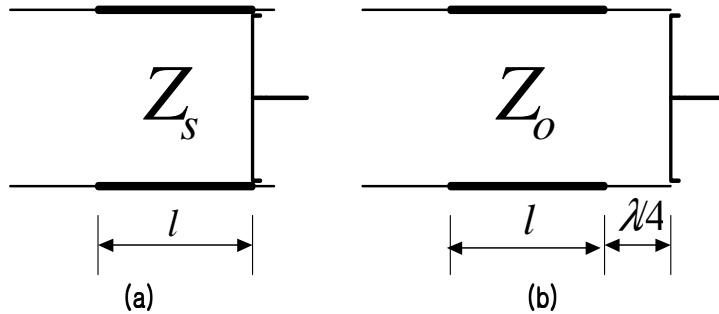


그림 3.6 개방·단락법

Fig. 3.6 Open·Short Line

그림 3.5는 우리가 일반적으로 접할 수 있는 동축관으로 공기층의 종단에 전파흡수체 재료를 삽입한 상태로 이것을 등가적으로 그림 3.6에 나타내었다.

그림 3.6(a)에서 전파흡수체의 두께  $d$  의 종단을 단락한 경우와 그림 3.6(b)와

같이 시료 종단에서  $\lambda/4$  만큼 떨어진 곳을 단락 한 경우의 입력에서 시료 측으로 들여다 본 입력 임피던스를 각각 측정으로 구한다.

여기서 식(3.39)을 정규화(normalization) 시키면

$$z(d) = \frac{z_L + \tanh \gamma d}{1 + z_L \tanh \gamma d} \quad (3.60)$$

이다. (a)의 경우는 시료의 종단이 단락 되어 있어  $z_L = 0$  이므로

$$z_s = z_c \tanh \gamma d \quad (3.61)$$

의 종단 단락 임피던스로 주어지고 (b)의 경우는 시료의 종단에서  $\lambda/4$  떨어진 곳이 단락 되어 있으므로 식(3.60)에서  $z_L = \infty$ ,  $\gamma = j\beta = j\frac{2\pi}{\lambda}$ ,  $l = \lambda/4$  로 두면 시료 종단에서 본 임피던스는

$$z_o = z_c \coth \gamma l \quad (3.62)$$

로 개방상태가 된다.

단락임피던스와 개방임피던스 식(3.61)와 (3.62) 두 식을 곱하면 특성임피던스는

$$z_c = \sqrt{z_s \cdot z_o} \quad (3.63)$$

식(3.61)와 (3.62) 두 식을 나누면

$$\tanh \gamma d = \sqrt{\frac{z_s}{z_o}} \quad (3.64)$$



$$\gamma = \frac{1}{d} \tanh^{-1} \sqrt{\frac{z_s}{z_o}} \quad (3.65)$$

이 된다.

여기서 선로 정규화특성임피던스와 전과정수는 식(3.36)과 식(3.38)~(3.40)의

$$z_c = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \quad (3.66)$$

$$\gamma = j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad (3.67)$$

두 식으로부터 비유전율과 비투자율은

$$\epsilon_r = -j \frac{\lambda}{2\pi} \cdot \frac{\gamma}{z_c} \quad (3.68)$$

$$\mu_r = -j \frac{\lambda}{2\pi} \cdot z_c \cdot \gamma \quad (3.69)$$

가 되어 복소유전율  $\epsilon_r$  과 복소투자율  $\mu_r$  을 구할 수 있다.

## (2) 길이 $l$ 의 변화에 의한 측정법

개방단락법은 시료의 종단을 단락 하거나 개방하여 재료정수를 구하지만 종단을 단락한 상태에서 시료의 길이를 변화시켜 구할 수도 있다. 그림 3.7과 같이 길이를  $l$  또는  $2l$  로 종단을 단락한 시료를 준비하여 시료의 전면에서의 정규화 임피던스를 측정하여  $z_1, z_2$  로 한다.

식(3.61)로부터  $z_L = 0$ , 길이는  $l$  또는  $2l$  이라고 두면, 각각의 값  $z_1, z_2$  는 다음과 같이 된다.

$$z_1 = z_c \tanh \gamma l \quad (3.70)$$

$$z_2 = z_c \tanh \gamma 2l \quad (3.71)$$

여기서 식(3.71)은  $\tanh$  성질을 이용하면

$$z_2 = \frac{2z_2}{1 + \tanh^2 \gamma l} \quad (3.72)$$

이 된다. 따라서 식(3.70)과 (3.72)로부터

$$\tanh \gamma l = \sqrt{\frac{2z_1 - z_2}{z_2}} \quad (3.73)$$

또 전파정수는

$$\gamma = \frac{1}{l} \tanh^{-1} \sqrt{\frac{2z_1 - z_2}{z_2}} \quad (3.74)$$

이 되고 식(3.70)과 (3.73)을 고려하면 특성임피던스는

$$z_c = z_1 \sqrt{\frac{z_2}{2z_1 - z_2}} \quad (3.75)$$

로 구해진다.

따라서 식(3.68)과 (3.69)을 사용하면 특성임피던스  $z_c$ 와  $\gamma$ 를 구할 수 있다.

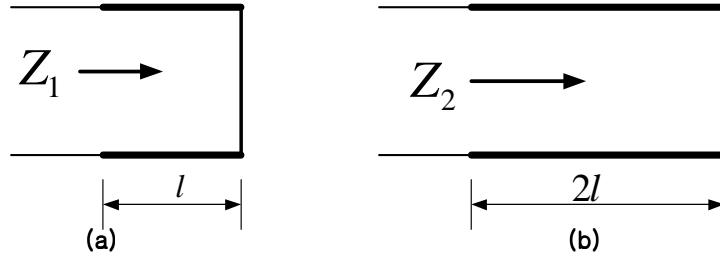


그림 3.7 길이  $l$  또는  $2l$  로 하는 경우  
 Fig 3.7 A Case of  $l$  or  $2l$  line

(3) 비자성 재료의 경우

복소유전율  $\epsilon_r$  과 복소투자율  $\mu_r$  을 구하는 방법으로 개방단락법이나 길이  $l$  의 변화에 의한 측정법은 일반적으로 어떠한 재료의 경우에도 사용할 수 있으나 비자성재료인 경우를 보면  $\mu_r$  는  $\mu_r' = 1, \mu_r'' = 0$  으로 진공 중  $\mu_0$  라고 들 수 있다. 따라서 정규화 임피던스와 전파정수는 식(3.36)과 (3.38)로부터  $\mu_r = 1$  로 들 수 있으므로

$$z_c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \tag{3.76}$$

$$\gamma = j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon_r} \tag{3.77}$$

로 되어 거리  $l$  에서 정규화 입력 임피던스는

$$z(l) = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \tanh j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon_r} \cdot l \tag{3.78}$$

이므로 여기서  $z(l), \lambda, l$  은 기저항으로 이 식을 만족하는  $\epsilon_r$  의 값을 정하면 된다. 오차를 줄이면서 좀 더 정확한 값을 얻기 위하여서는 일반적으로  $l$  의 값을 여러 가지로 바꾸면서 그것에 대한  $z(l)$  의 궤적을 측정하고, 식(3.78)을 그 궤적에 가깝게 되도록  $\epsilon_r$  을 정하는 것이 필요하다.

(4) 자성재료  $\mu_r$  만의 측정

자성재료에서 시료의 종단을 단락하고 또한 시료의 길이  $l$ 이 다음조건을 만족할 정도의 얇은 박막의 경우를 보면 간단히  $\mu_r$ 을 구할 수 있다.

그림 3.3(a)에서 식(3.36)과 (3.38)의 정규화임피던스와 전파정수를 적용하면

$$z_s = z_c \tanh \gamma \cdot l = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tanh\left(j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \cdot l\right) \quad (3.79)$$

로 된다. 여기서  $|\gamma \cdot l| \ll 1$ 을 만족시키는  $l$ 을 정하면 이 조건에서는

$$\tanh \gamma \cdot l \cong \gamma \cdot l \quad (3.80)$$

이 되어 식(3.79)에 대입하면

$$z_s \cong \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \cdot l = j \frac{2\pi}{\lambda} \mu_r \cdot l \quad (3.81)$$

식(3.81)로부터

$$\mu_r = -j \frac{\lambda}{2\pi l} z_s \quad (3.82)$$

로  $\mu_r$ 이 구해진다.

(5) 자성재료에서  $\epsilon_r$  만의 측정

분포정수회로에서 종단이 개방된 경우 그림 3.3(b)와 같이 식(3.74)와 식(3.36) (3.38)의 정규화임피던스와 전파정수를 적용하여

$$z_o = z_c \coth \gamma l = \sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}} \coth j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\mu_r \varepsilon_r} \cdot l \quad (3.83)$$

이 된다. 여기서  $l$ 이 매우 얇은  $|\gamma l| \ll 1$ 을 만족시킨다고 한다면

$$\coth \gamma l = \frac{1}{\gamma l} \quad (3.84)$$

이므로 식(3.83)에 대입하여

$$z_o = \sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}} \frac{1}{j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\mu_r \varepsilon_r} l} = \frac{\lambda}{j 2\pi \varepsilon_r l} \quad (3.85)$$

이 되어  $\varepsilon_r$ 은

$$\varepsilon_r = -j \frac{\lambda}{2\pi z_o l} \quad (3.86)$$

로 구할 수 있다[20][21].

### 3.2.3 표면저항 측정법

#### (1) 표면저항

표면저항은 보통 단위를 ohm/sq.,  $\Omega/\square$  또는  $\Omega\square$ 로 사용하며, 반사와 무반사 전파흡수체를 디자인 할 때, 손실 메커니즘을 제공하기 위해 저항시트에 이용한다. 이런 시트의 특성은 저항과 임피던스로 보통 묘사되며, 만약 그림 3.8(a)에 서 보이는 것처럼,  $\Omega\text{-}m$ 의 저항  $\rho$ 의 물질은 저항을 만들고, 두 개의 반대편 사이에서 저항은 다음 식에서 주어진다.

$$R = \frac{\rho L}{A} = \frac{\rho L}{WT} \quad (3.87)$$

여기서,  $L$ 은 두 표면사이에서 블록의 길이,  $W$ 는 폭,  $T$ 는 두께,  $A$ 는 단면적을 나타낸다.

만약 그림 3.8(b)의 도전성 물질시트에서 두 바의 거리  $W$  사이에서 저항을 측정하면,

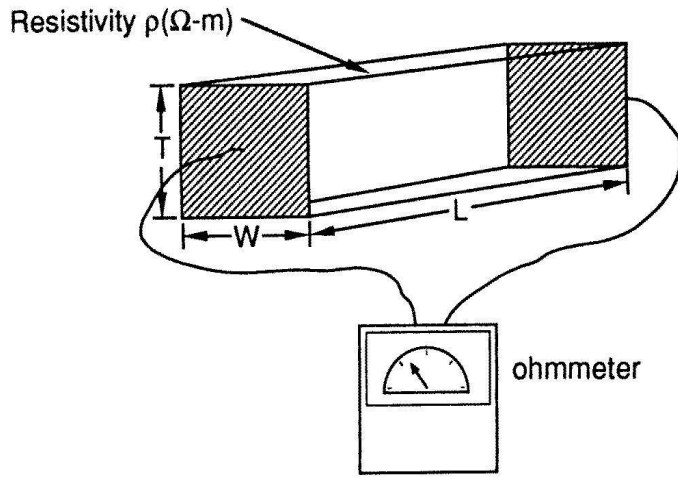
식 (3.87)은 식( 3.88)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R = \frac{\rho}{T} = \frac{1}{\sigma T} \quad (3.88)$$

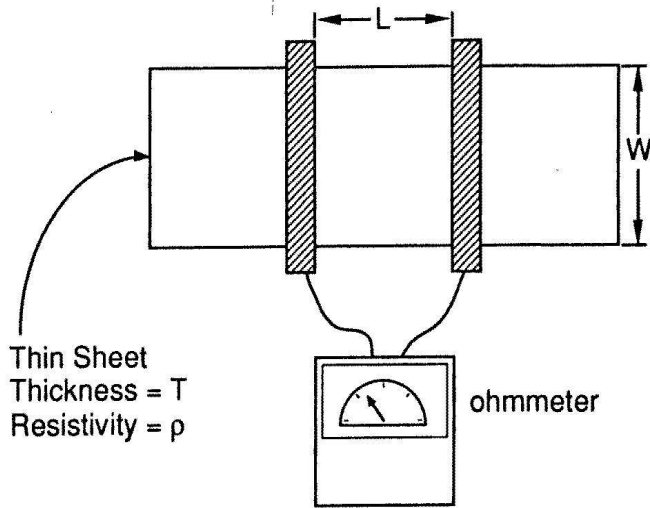
즉, 물질의 단위면적당 저항을 측정한다면, 단위면적의 변화에 관계없이 결과는 같게 될 것이다. 따라서 단위면적당 옴으로 나타난다[22].

#### (2) 비저항

비저항은 단위길이와 단면적의 물질이 갖는 저항의 크기를 말하며, 물질마다 다르기 때문에 물질의 특성이 될 수 있다. 표면저항에 물질두께의 곱으로 표현할 수 있으며, 단위는 ohm · cm 또는  $\Omega \cdot \text{cm}$ 로 나타낸다.



(a) 저항체 블록



(b) 표면저항 측정( $\Omega/\text{sq.}$ )

그림 3.23 표면저항 측정 시스템

Fig 3.8 The Measurement System for Sheet Resistivity

# 제 4 장 전파흡수체 제작 및 재료정수 측정

## 4.1 전파흡수체 제작방법

전파흡수체 제작방법은 크게 나누어 롤 방식과 핫프레스 방식이 있는데, 본 논문에서는 롤 방식을 사용하여 제작하였다.

그림 4.1은 그 제조공정을 보여주고 있다. 그림에서 보이듯이 카본과 CPE를 체적비에 따른 조성비로 혼합하여 70°C에서 롤러를 사용하여 시트를 제작하였다.

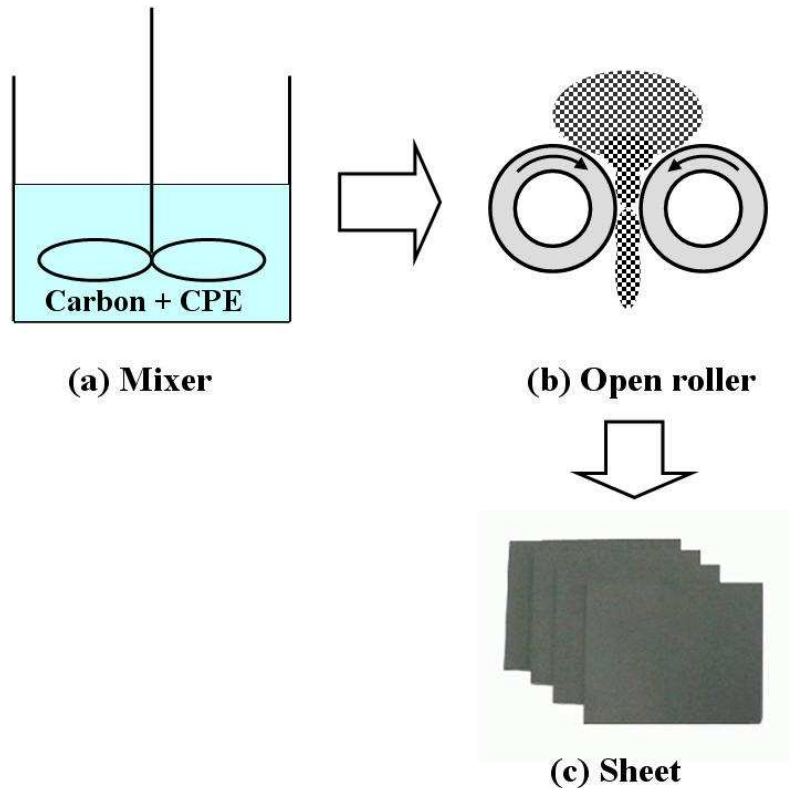


그림 4.1 전파흡수체의 제작공정

Fig. 4.1 Manufacturing process of EM wave absorber



## 4.2 전파흡수체 샘플의 제작

전파흡수체의 제작시 지지재로 CPE를 사용하였으며, 전파흡수 재료는 카본을 사용하였다. 전파흡수 재료와 지지재의 조성비에 따른 전파흡수 특성이 어떻게 변화하는지를 알아보기 위해서 표 4.1과 같은 비율로 전파흡수체 샘플을 그림 4.1과 같은 공정과정을 거쳐 시트상태로 제작하였다.

표 4.1 전파흡수체 재료의 조성비  
Table 4.1 Composition rate of Materials for EM  
Wave Absorber

Carbon(vol.%)	CPE(vol.%)
30	70
40	60
50	50
60	40
70	30

### 4.3 복소비유전율 측정

카본을 전파흡수체로 혼합하여 전파흡수체를 제작하였으므로 비자성재료이기 때문에 복소비투자율  $\mu_r$ 은 1로 계산하고, 복소비유전율  $\epsilon_r$ 은 길이  $l$ 의 변화( $l, 2l$ )에 의한 측정법으로 임피던스를 측정하여, MatLab 프로그램을 이용하여 샘플의 조성비에 따라 각각의 복소비유전율을 계산하였다.

#### 4.3.1 사용된 Sample 및 Sample Holder

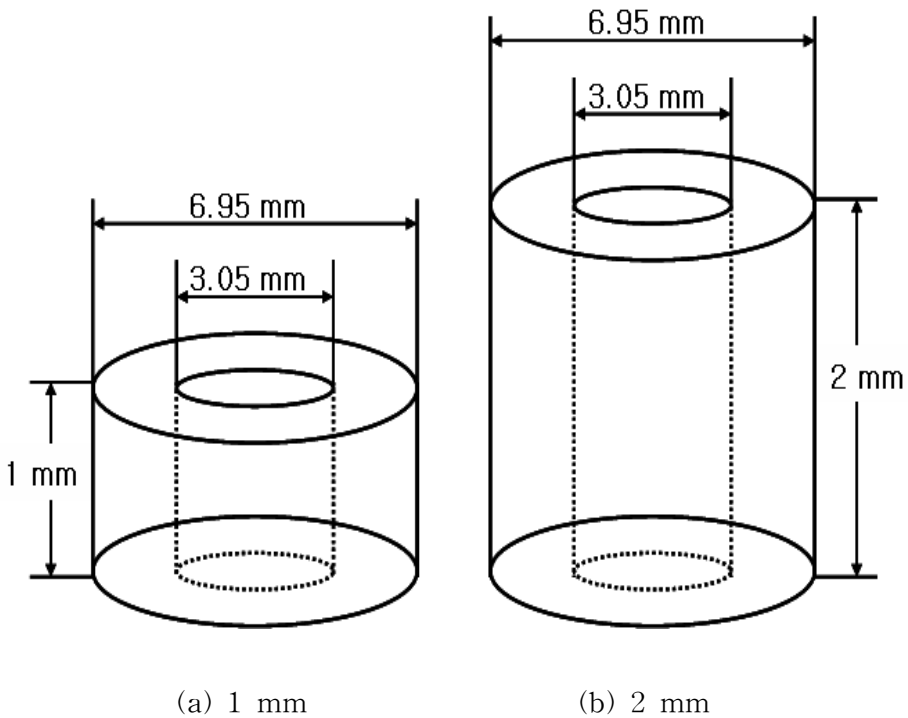
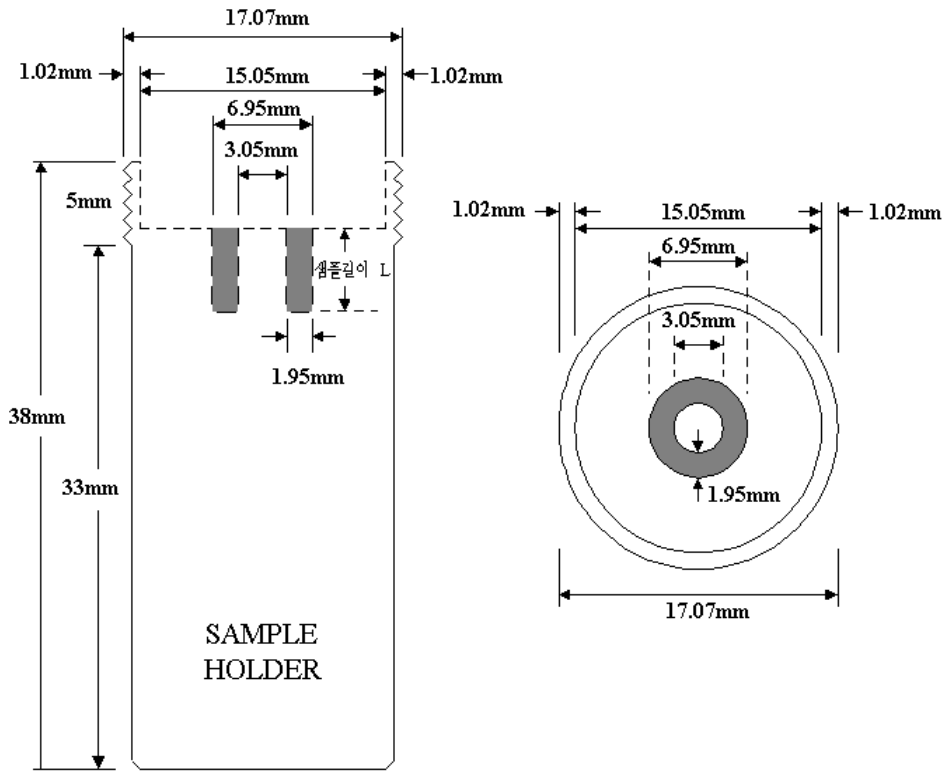


그림 4.2 제작된 샘플

Fig. 4.2 Manufactured sample

그림 4.2은 One-Port Method  $l-2l$  법을 사용하여 전파흡수체의 전파흡수능과 재료정수를 측정한 시료의 1 mm, 2 mm 샘플 도면이다.

그림 4.3은 시료를 측정할 수 있도록 만들어진 샘플홀더의 단면(a)과 위에서 본 평면(b)의 그림이다. 진하게 칠해져 있는 부분이 샘플이 삽입되는 곳이며, 이 샘플홀더는 Network Analyzer(Wiltron 360B)와 연결 했을 때 틈이 생기지 않는다.



(a) 샘플홀더의 단면 (b) 샘플홀더의 평면

그림 4.3 샘플홀더의 단면도와 평면도

Fig. 4.3 Sample holder (a)Section and (b)Plane.

Network Analyzer(Wiltron 360B)와 샘플홀더의 실제 모습은 그림 4.4와 그림 4.5에 나타내었다.



그림 4.4 네트워크 애널라이저(Wiltron 360B)

Fig. 4.4 Network Analyzer(Wiltron 360B)



그림 4.5 샘플홀더 실제모습

Fig. 4.5 View of sample holder

### 4.3.2 복소비유전율 계산방법

본 논문에서의 전파흡수체 시료의 재료정수는 Wiltron 360B를 사용하여 측정된 임피던스를 가지고, 다음과 같은 방법으로 계산하였다. 그림 4.6과 4.7에서 보는 것과 같이 Network Analyzer의 Port와 Sample Holder 사이에 틈이 없이 밀착시키면, Reference Plane에서의 반사계수  $S_{11}(\ell)$ 은 전체의 반사계수와 같게 된다. 그러므로 Short Sample의 측정치로 전체 반사계수를 측정할 필요 없이 Sample 길이가  $\ell$  일 때와  $2\ell$  일 때의 임피던스만 계산하면 된다.

그림 4.4와 같이 Sample 길이가  $\ell$  일 때의 임피던스는

$$Z(\ell) = \frac{1 + S_{11}(\ell)}{1 - S_{11}(\ell)} \quad (4.1)$$

와 같이 구해진다. 그림 4.5와 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 임피던스는 식 (4.2)와 같다.

$$Z(2\ell) = \frac{1 + S_{11}(2\ell)}{1 - S_{11}(2\ell)} \quad (4.2)$$

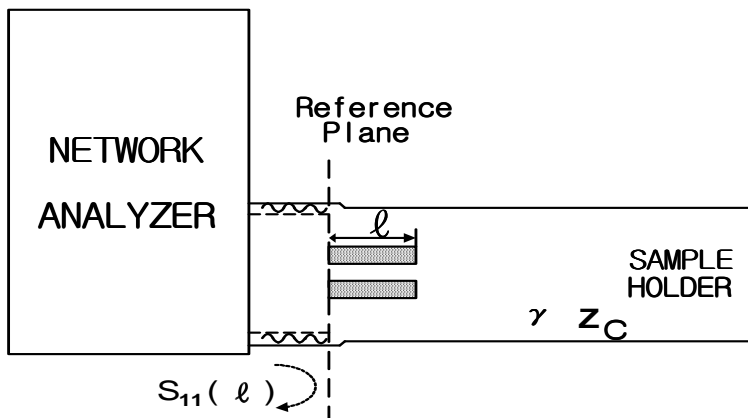


그림 4.6 샘플의 길이가  $\ell$  인 샘플홀더

Fig. 4.6 Sample holder with sample length  $\ell$ .

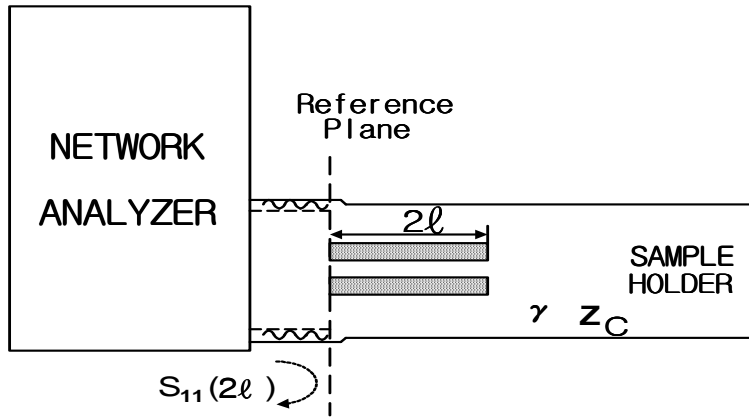


그림 4.7 샘플의 길이가  $2\ell$  인 샘플홀더  
 Fig. 4.7 Sample holder with sample length  $2\ell$ .

한편 Network Analyzer의 Port와 Sample Holder는 틈이 없이 밀착되므로, 식 (4.1)과 식 (4.2)는

$$Z(\ell) = Z_c \tanh(\gamma \ell) \quad (4.3)$$

$$Z(2\ell) = Z_c \tanh(\gamma 2\ell) \quad (4.4)$$

와 같이 쓸 수 있다. 식 (4.3)과 식 (4.4)에 하이퍼블릭 탄젠트 공식을 적용하면,

$$\tanh(\gamma 2\ell) = \frac{2 \tanh(\gamma \ell)}{1 + \tanh^2(\gamma \ell)} \quad (4.5)$$

이 되고, 식 (4.5)을 변형하면

$$Z(2\ell) = \frac{2 \tanh(\gamma \ell)}{1 + \tanh^2(\gamma \ell)} \quad (4.6)$$

$$\tanh(\gamma \ell) = \sqrt{\frac{2Z(\ell) - Z(2\ell)}{Z(2\ell)}} \quad (4.7)$$

이 된다. 식 (4.7)로 부터  $\gamma$ ,  $Z_c$ 을 도출하면,

$$\gamma = \frac{1}{\ell} \tanh^{-1} \sqrt{\frac{2Z(\ell) - Z(2\ell)}{Z(2\ell)}} \quad (4.8)$$

$$Z_c = Z(\ell) \sqrt{\frac{Z(2\ell)}{2Z(\ell) - Z(2\ell)}} \quad (4.9)$$

이 된다. 식 (4.8)과 식 (4.9)을 식 (3.76)이나 식 (3.77)에 대입해서 풀면, 복소비유전율  $\epsilon_r$ 을 구할 수 있다. 여기서 구하여진 복소비유전율을 두께  $d$ 의 전파흡수체를 판상으로 하여 금속판 위에 놓은 경우, 평면파의 수직입사에 대한 파동임피던스  $z$ 는 진공중의 평면파 파동임피던스로 정규화한 식 (2.20)에 대입하여 정규화된 임피던스를 구한다음, 식 (2.30)에 대입하여 각 두께에 따른 반사계수를 예측하였다.

### 4.3.3 샘플의 조성비에 따른 복소비유전율

표 4.1에 나타낸 조성비에 따라 전파흡수체를 제작하고 두께에 따른 전파흡수능을 예측하기 위한 시뮬레이션하기 위해 조성비별로 샘플의 두께를 1 mm와 2 mm로 해서 길이변화에 의한 측정법으로 측정하여 MatLab으로 재료정수를 계산하여 그림 4.8 ~ 그림 4.12에 나타내었다.

조성비는 흡수재료인 카본은 30, 40, 50, 60, 70 vol.%로 지지체인 CPE 는 70, 60, 50, 40, 30 vol.%의 조성비로 10 vol.% 단위로 변화시키면서 전파흡수체를 제작하였다.

측정결과 카본 : CPE = 30 : 70 vol%, 카본 : CPE = 40 : 60 vol%, 카본 : CPE = 50 : 50 vol%인 그림 4.8, 그림 4.9, 그림 4.10을 보면, 손실탄젠트가 1인 ( $\tan\delta=1$ ) 지점이 11 GHz 대역에서 나타났으며, 전반적으로 손실항인  $\epsilon_r''$  값이  $\epsilon_r'$ 보다 작은 값을 가지는 것을 볼 수 있다.

또한 카본 : CPE = 60 : 40 vol%, 카본 : CPE = 70 : 30 vol%인 그림 4.11

과 그림 4.12은 손실탄젠트가 1인 ( $\tan\delta=1$ ) 지점이 2~3 GHz 대역에서 나타났으며, 전반적으로 손실항인  $\epsilon_r''$  값이  $\epsilon_r'$ 보다 큰 값을 가지는 것을 볼 수 있다. 즉, 카본의 함유량이 증가할수록  $\tan\delta=1$ 인 영역이 저주파로 이동하였으며, 대부분의 대역에서 손실항이 증가하는 것을 볼 수 있다.

따라서 적층형 전파흡수체를 디자인할 때에 카본 : CPE = 60 : 40 vol%, 카본 : CPE = 70 : 30 vol%의 시트를 시뮬레이션을 이용하여 적층 위치 및 최적의 두께를 도출하였다.

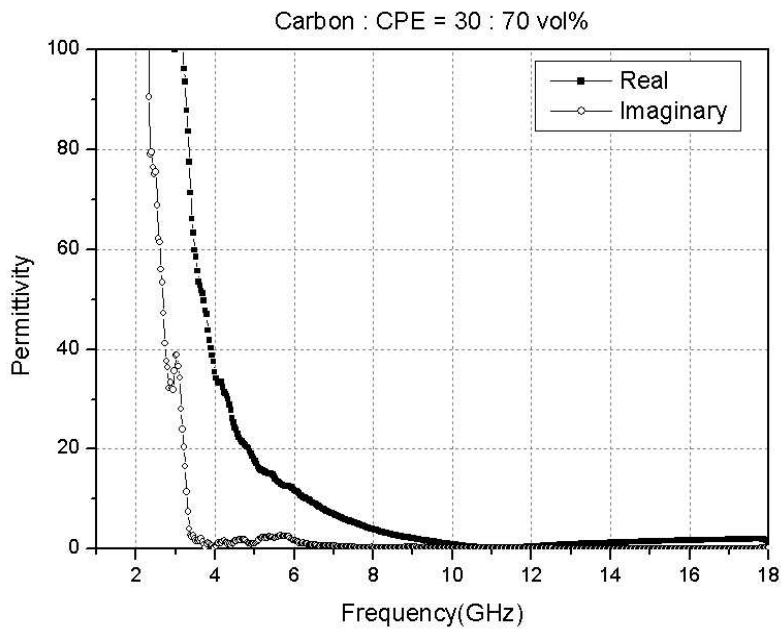


그림 4.8 복소비유전율(카본:CPE=30:70 vol%)

Fig. 4.8 Complex permittivity(Carbon:CPE=30:70 vol%)



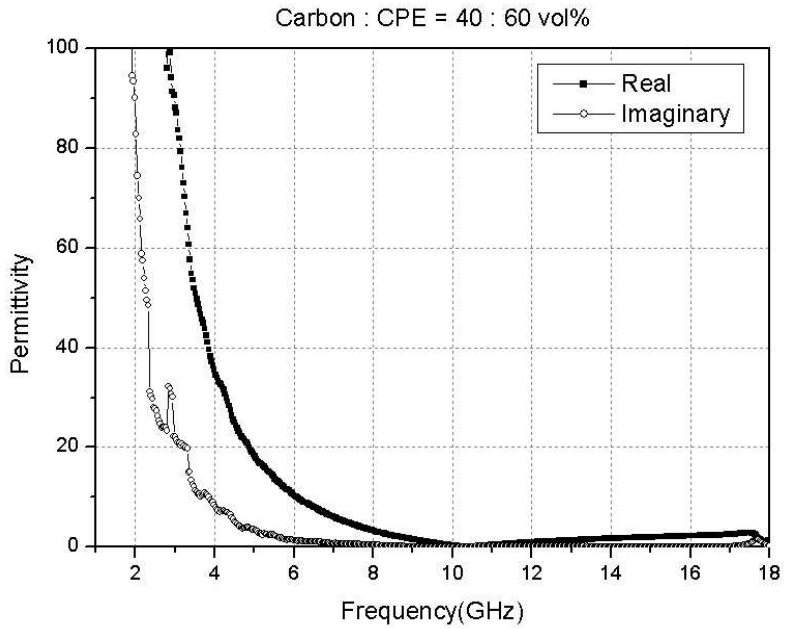


그림 4.9 복소비유전율(카본:CPE=40:60 vol%)

Fig. 4.9 Complex permittivity(Carbon:CPE=40:60 vol%)

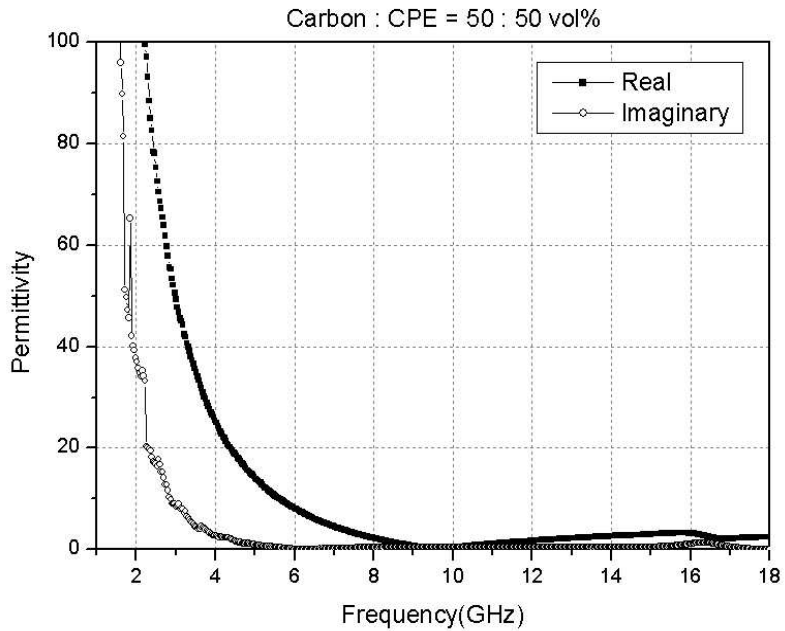


그림 4.10 복소비유전율(카본:CPE=50:50 vol%)

Fig. 4.10 Complex permittivity(Carbon:CPE=50:50 vol%)

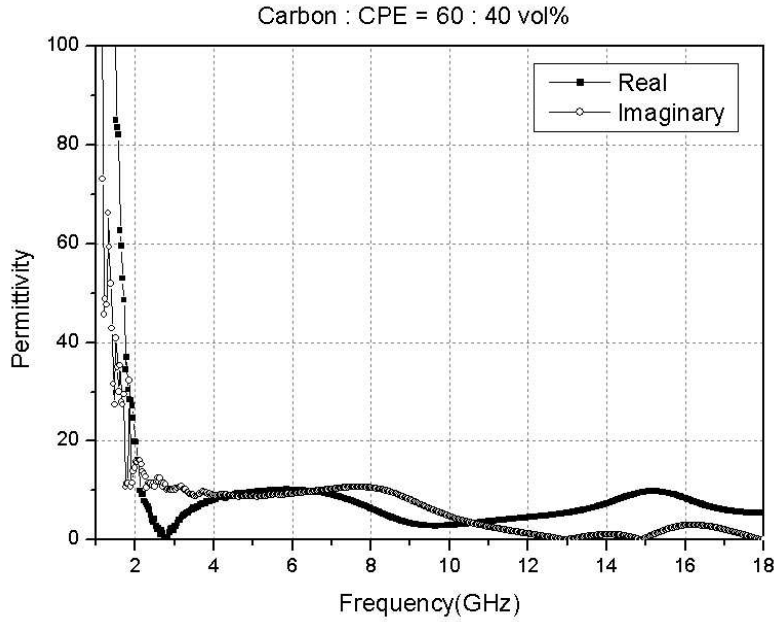


그림 4.11 복소비유전율(카본:CPE=60:40 vol%)  
 Fig. 4.11 Complex permittivity(Carbon:CPE=60:40 vol%)

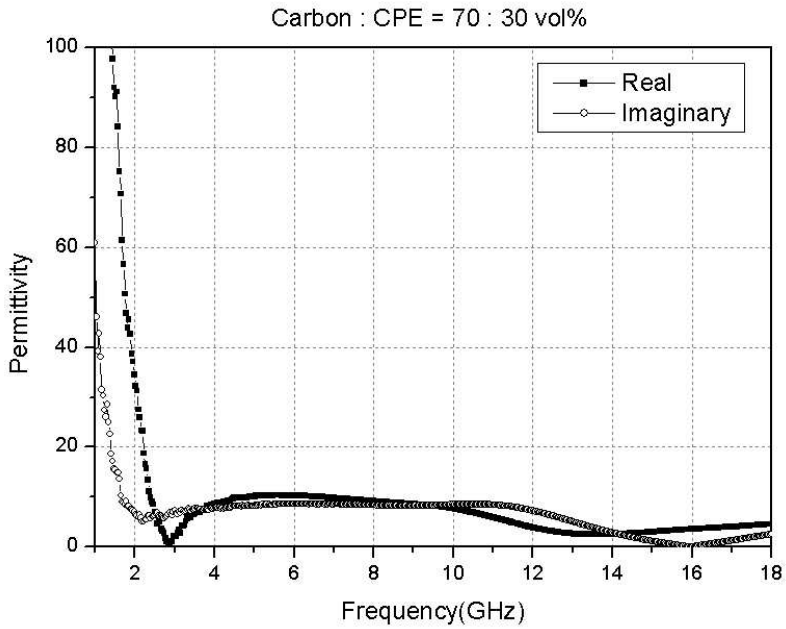


그림 4.12 복소비유전율(카본:CPE=70:30 vol%)  
 Fig. 4.12 Complex permittivity(Carbon:CPE=70:30 vol%)

## 4.4 표면저항 측정

저항체에 전류를 흘리면 흐르는 전류에 의해 열이 발생한다. 이와 마찬가지로 유한한 도전율  $\sigma$ 를 가지는 매질에 전계가 가해지면 도전전류가 흘러서 전자와 에너지가 열로 변환된다. 이런 재료로 전파흡수용으로 널리 쓰이는 것은 카본이다. 이밖에도 도전성 손실재료는 도전성 섬유를 부직포 형태로 짜서 만든 베나 산화인듐 방울을 증착한 유전체 시트 등이 있다. 이들은 저항피막이라 불리우며, 그 전기적 특성은 두께에 무시할 수 있는 정방 형상의 저항으로서 표면저항치( $\Omega\Box$ )로 표시된다. 본 논문에서는 4단자법에 의해서 표면저항을 측정하였다.

### 4.4.1 사용된 측정 시스템

그림 4.13은 (주)재성의 four-point probe 표면저항 측정기이다. four-point probe는 동일선상에 놓여진 텅스텐 와이어 프로브를 포함하고 있으며, 샘플의 표면을 접촉하도록 되어있다. 전류는 바깥쪽 프로브 사이에서 흐르며, 전압은 안쪽의 프로브 사이에서 측정하여 전류의 손실이 없도록 되어있다. 표면저항 측정기로 측정된 저항에 Correction factor를 곱하여 정확한 표면저항치를 계산한다.



그림 4.13 4단자법의 표면저항 측정기

Fig. 4.13 The measurement system of sheet resistivity with four point probe

#### 4.4.2 측정 결과

4단자법에 의하여 측정된 표면저항은 보정계수를 곱해야한다. 보정계수는 샘플 사이즈와 박막의 두께 그리고 측정시 온도까지 3가지 계수를 곱해서 산출되는 것으로 4단자 간격의 40배인 40 mm 이상의 직경을 가진 샘플일 경우 통상 보정계수로 4.532를 곱하여 계산한다. 본 논문의 전과흡수체 시트의 샘플은 직경이 40 mm이상이므로 보정계수 4.532를 곱하였으며, 3차에 걸쳐 측정하여 평균값과 함께 표기하여 표 4.2에 나타내었다.

카본의 함유량이 30 vol%와 40 vol%인 전과흡수체 샘플은 측정기의 한계치를 넘어 계산할 수가 없었으며, 카본의 함유량이 50 vol% 그 이상으로 증가할 수록 표면저항치가 감소하는 것을 즉, 전과흡수손실을 가져오는 도전율이 증가하는 것을 볼 수 있었다.

따라서 적층형 전과흡수체를 시뮬레이션 할 때에는 공기 중의 임피던스와 전과흡수체의 임피던스 매칭을 위해 카본이 60 vol.% 인 전과흡수체를 표면에 위치하게 하였다.

구 분		표면저항( $\Omega/\square$ )	비 고
카본:CPE =50:50 vol%	1차	4950	
	2차	5850	
	3차	4860	
	평균	5220	
카본:CPE =60:40 vol%	1차	242	
	2차	301	
	3차	293	
	평균	279	
카본:CPE =70:30 vol%	1차	160	
	2차	174	
	3차	167	
	평균	167	

표 4.2 샘플별 측정된 표면 저항치  
Table 4.2 Sheet Resistivity of Sample

# 제 5 장 시뮬레이션 및 측정 결과

카본을 사용하여 전파흡수체를 제작하고, 샘플홀더에 시료를 삽입하여 Network Analyzer를 이용 입력임피던스를 측정하고 MatLab을 이용하여 재료 정수인 복소비유전율을 계산한 다음 두께에 따른 흡수능의 변화를 시뮬레이션 하여 실측정치와 비교분석하였다.

## 5.1 단층형일 경우

앞에서 구해진 재료정수인 복소비유전율( $\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r''$ )을 이용하여 조성비 별로 두께에 따라서 반사계수가 어떻게 변하는지를 시뮬레이션하고 그 결과를 그림 5.1 ~ 그림 5.5에 나타내었다. 실제 측정한 측정치는 그림 5.6 ~ 그림 5.10에 나타내었으며 시뮬레이션 값과 실측치를 비교한 것은 그림 5.11 ~ 그림 5.25에 나타내었다. 각각의 조성비는 카본 : CPE = 30 : 70 vol.%, 카본 : CPE = 40 : 60 vol.%, 카본 : CPE = 50 : 50 vol.%, 카본 : CPE = 60 : 40 vol.%, 그리고 카본 : CPE = 70 : 30 vol.%이고 두께는 1.5 mm, 2 mm, 3 mm 에서의 반사계수를 그림으로 나타내었다.

### 5.1.1 시뮬레이션 결과

그림 5.1은 조성비가 카본 : CPE = 30 : 70 vol.% 이고, 두께가 1.5 mm, 2 mm, 3 mm 일 때 반사계수의 변화를 시뮬레이션 한 결과이다.

그림 5.2는 조성비가 카본 : CPE = 40 : 60 vol.% 이고, 두께가 1.5 mm, 2 mm, 3 mm 일 때 반사계수의 변화를 시뮬레이션 한 결과이다.

조성비가 카본 : CPE = 30 : 70 vol.% 와 카본 : CPE = 40 : 60 vol.% 는 반사계수가 -3 dB 이하의 낮은 전파흡수 특성을 보인다.

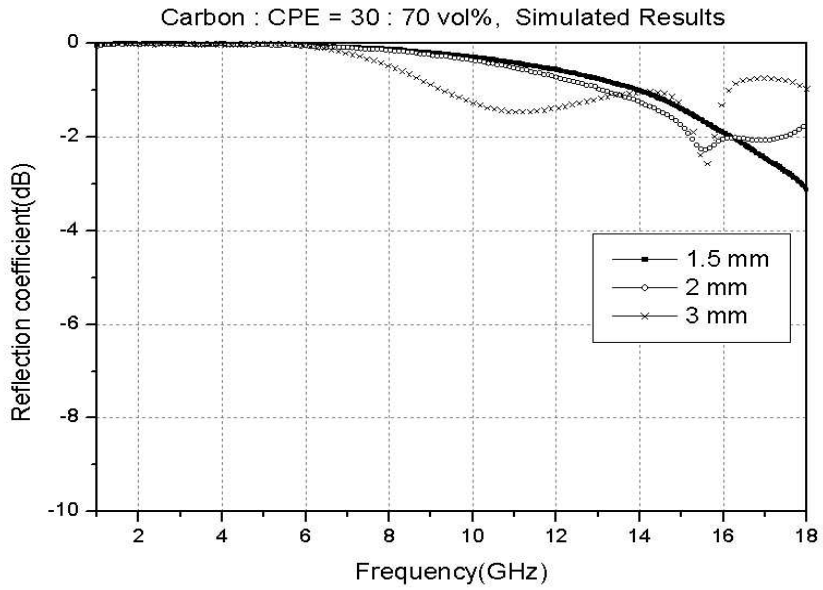


그림 5.1 시뮬레이션 결과(카본:CPE=30:70 vol.%)  
 Fig. 5.1 Simulated results(Carbon:CPE=30:70 vol.%)

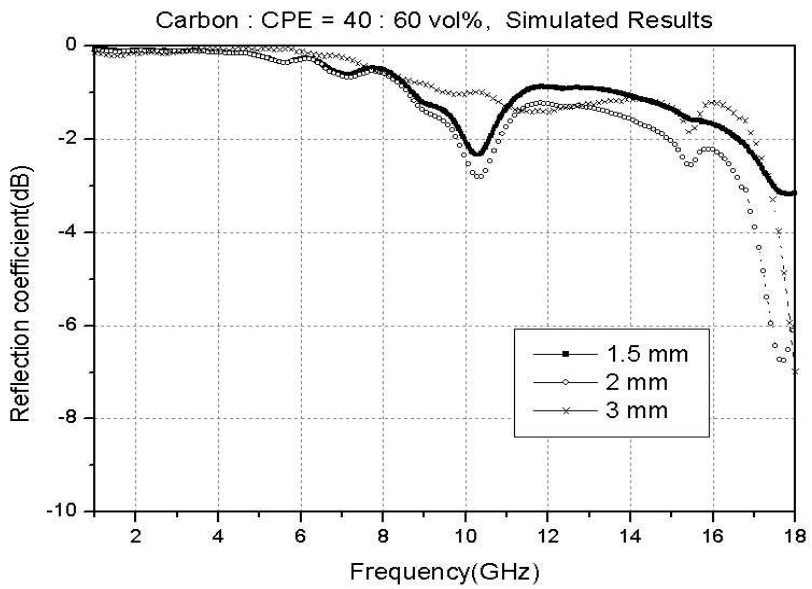


그림 5.2 시뮬레이션 결과(카본:CPE=40:60 vol.%)  
 Fig. 5.2 Simulated results(Carbon:CPE=40:60 vol.%)

그림 5.3은 조성비가 카본 : CPE = 50 : 50 vol.% 이고, 두께가 1.5 mm, 2 mm, 3 mm 일 때 반사계수의 변화를 시뮬레이션 한 결과이다.

조성비가 카본 : CPE = 50 : 50 vol.%의 시뮬레이션 값은 두께 1.5 mm에서 주파수 15.5 GHz ~ 18 GHz 까지 반사계수가 -5 dB 이상으로 예측되었고, 두께 2 mm에서 주파수 15 GHz ~ 17.2 GHz 까지 반사계수가 -5 dB 이상 예측되었으며, 두께 3 mm에서 주파수 8.9 GHz ~ 14 GHz 까지 반사계수 -5 dB 이상이 예측되어 전파흡수능이 미약함을 보였다.

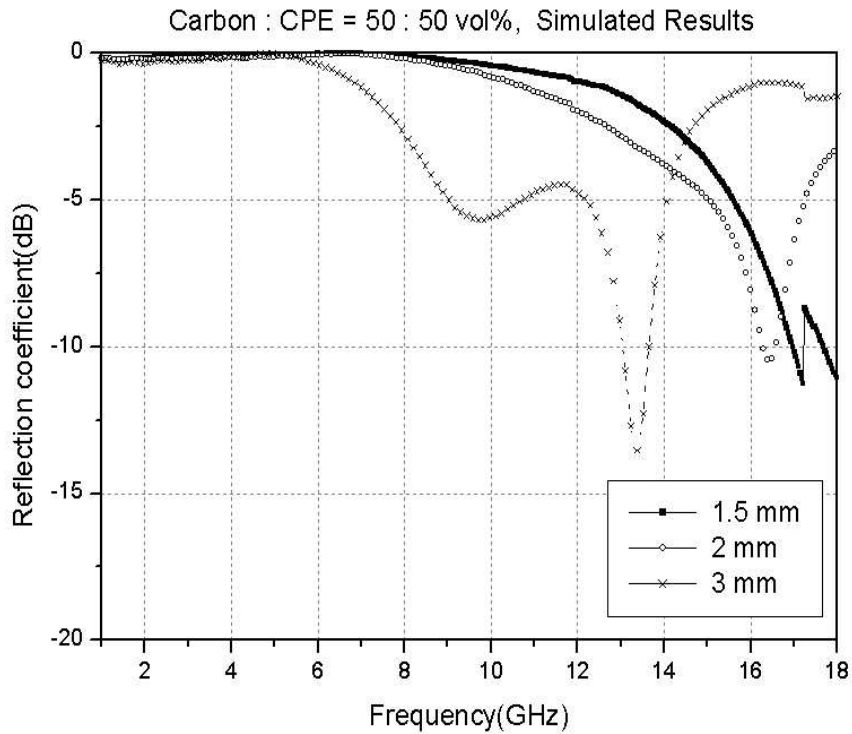


그림 5.3 시뮬레이션 결과(카본:CPE=50:50 vol.%)

Fig. 5.3 Simulated results(Carbon:CPE=50:50 vol.%)

그림 5.4는 조성비가 카본 : CPE = 60 : 40 vol.% 이고, 두께가 1.5 mm, 2 mm, 3 mm 일 때 반사계수의 변화를 시뮬레이션 한 결과이다.

조성비가 카본 : CPE = 60 : 40 vol.% 에서는 특정 주파수대에서 우수한 전파흡수 특성을 보였다.

두께 1.5 mm에서 주파수 12.5 GHz ~ 18 GHz 까지 반사계수가 -10 dB 이상으로 예측되었고, 두께 2 mm에서 주파수 9 GHz ~ 14.5 GHz 까지 반사계수가 -10 dB 이상 예측되었으며, 두께 3 mm에서 주파수 5.5 GHz ~ 12.2 GHz 까지 반사계수 -7 dB 이상이 예측되었다.

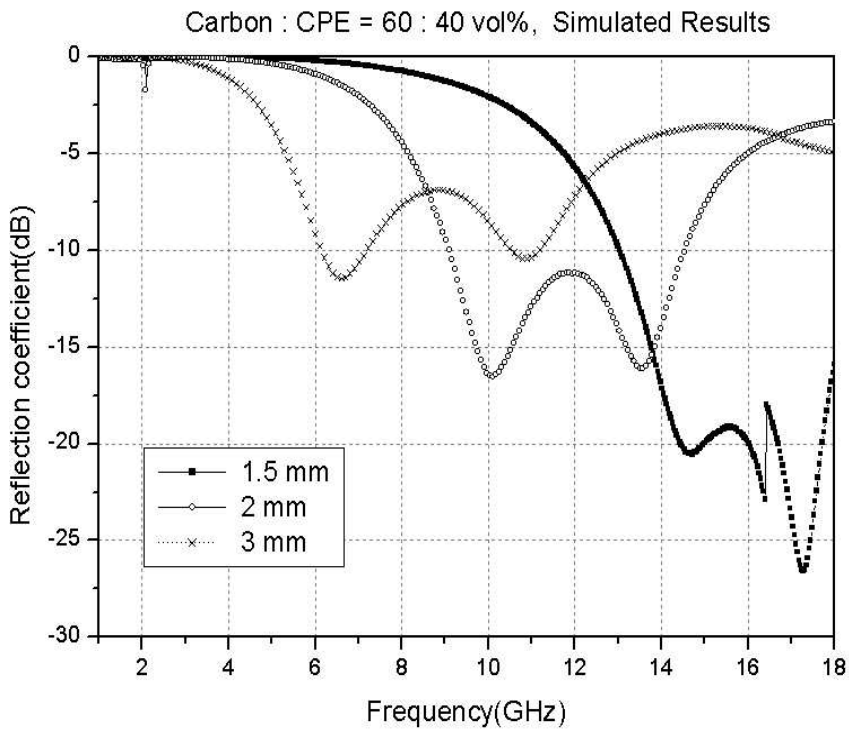


그림 5.4 시뮬레이션 결과(카본:CPE=60:40 vol.%)

Fig. 5.4 Simulated results(Carbon:CPE=60:40 vol.%)



그림 5.5는 조성비가 카본 : CPE = 70 : 30 vol.% 이고, 두께가 1.5 mm, 2 mm, 3 mm 일 때 반사계수의 변화를 시뮬레이션 한 결과이다.

조성비가 카본 : CPE = 70 : 30 vol.%의 시뮬레이션 값은 두께 1.5 mm에서 주파수 14.3 GHz ~ 17.1 GHz 까지 반사계수가 -10 dB 이상으로 예측되었으며, 두께 2 mm에서 주파수 8.8 GHz ~ 12.2 GHz 까지 반사계수가 -10 dB 이상 예측되었고, 두께 3 mm에서 주파수 6 GHz ~ 8 GHz 까지 반사계수 -10 dB 이상이 예측되었다.

시뮬레이션 결과, 카본의 함유량이 60 vol.% 까지 증가할수록, 반사계수가 증가하는 현상이 나타났으며 정합주파수가 저주파 영역으로 이동하는 현상이 나타났다. 또한 같은 함유량에서는 두께가 두꺼워질수록 저주파 영역으로 정합주파수가 이동하는 현상을 볼 수 있다.

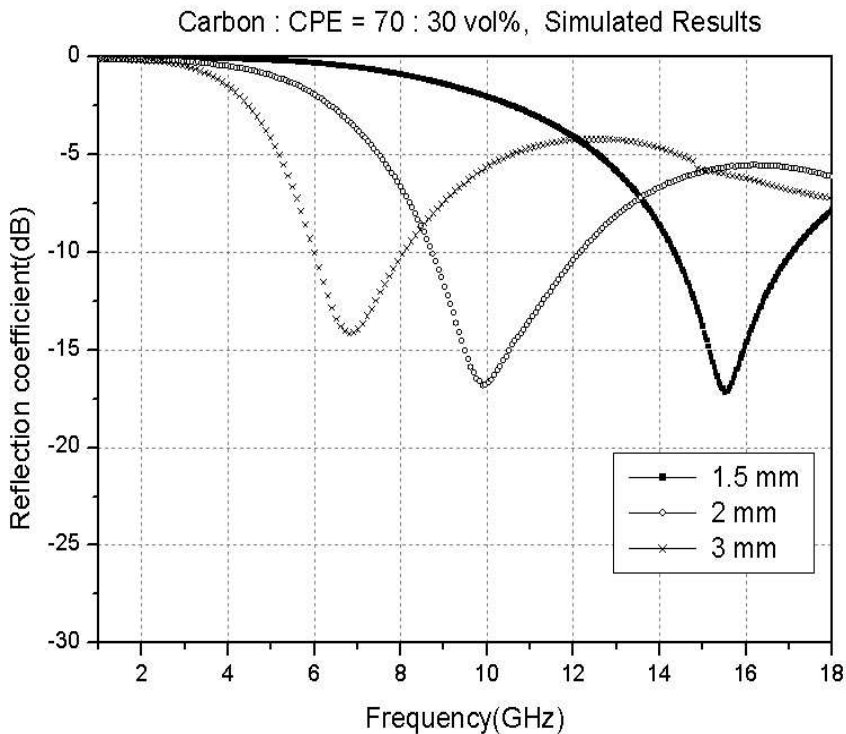


그림 5.5 시뮬레이션 결과(카본:CPE=70:30 vol.%)  
 Fig. 5.5 Simulated results(Carbon:CPE=70:30 vol.%)

### 5.1.2 실측정 결과

시뮬레이션과 비교하기 위해, 실 제작된 전파흡수체의 반사계수를 그림 5.6 ~ 5.10에 나타내었다.

그림 5.6은 조성비가 카본 : CPE = 30 : 70 vol.%이고, 두께 1.5 mm, 2 mm, 3 mm 일 때의 반사계수를 나타낸다.

조성비가 카본 : CPE = 30 : 70 vol.%의 실측정 값은 두께 1.5 mm ~ 3 mm까지 모두 반사계수가 -3 dB 이하로 측정되었다.

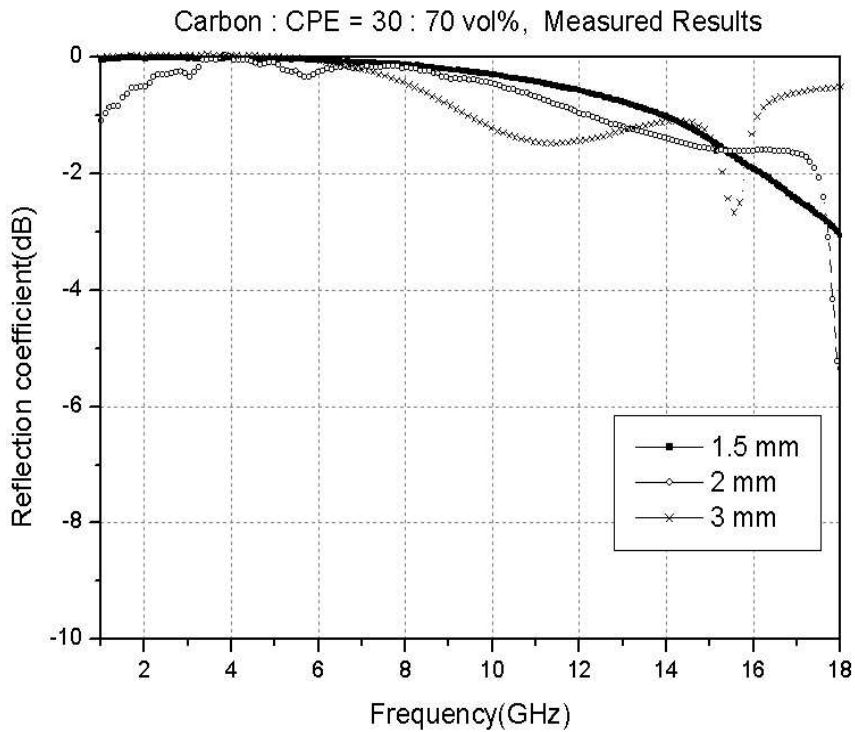


그림 5.6 실측치(카본:CPE=30:70 vol.%)  
Fig. 5.6 Measured results(Carbon:CPE=30:70 vol.%)

그림 5.7은 조성비가 카본 : CPE = 40 : 60 vol.%이고, 두께 1.5 mm, 2 mm, 3 mm 일 때의 반사계수를 나타낸다.

조성비가 카본 : CPE = 40 : 60 vol.%의 실측값 값은 두께 1.5 mm ~ 3 mm 까지 모두 반사계수가 -3 dB 이하로 측정되었으며, 주파수 17 GHz ~ 18 GHz 에서 -5 dB 이상으로 측정되었다.

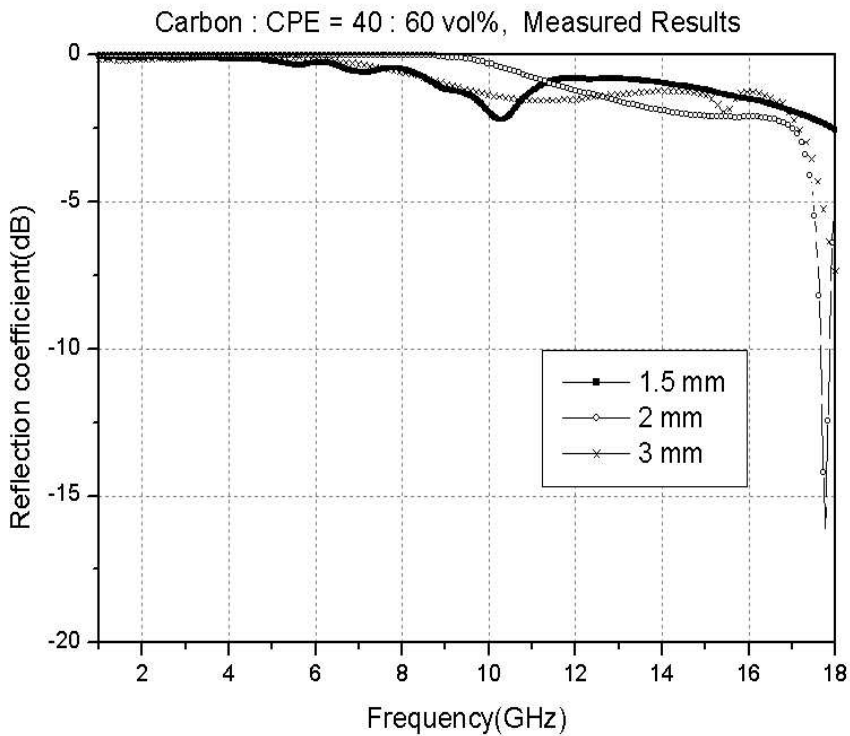


그림 5.7 실측치(카본:CPE=40:60 vol.%)  
 Fig. 5.7 Measured results(Carbon:CPE=40:60 vol.%)

그림 5.8은 조성비가 카본 : CPE = 50 : 50 vol.%이고, 두께 1.5 mm, 2 mm, 3 mm 일 때의 반사계수를 나타낸다.

조성비가 카본 : CPE = 50 : 50 vol.%의 실측값 낮은 두께 1.5 mm에서 주파수 15.5 GHz ~ 18 GHz 까지 반사계수가 -5 dB 이상으로 측정되었고, 두께 2 mm에서 주파수 14 GHz ~ 17.2 GHz 까지 반사계수가 -5 dB 이상 측정되었으며, 두께 3 mm에서 주파수 8.6 GHz ~ 14.2 GHz 까지 반사계수 -4 dB 이상으로 측정되었다.

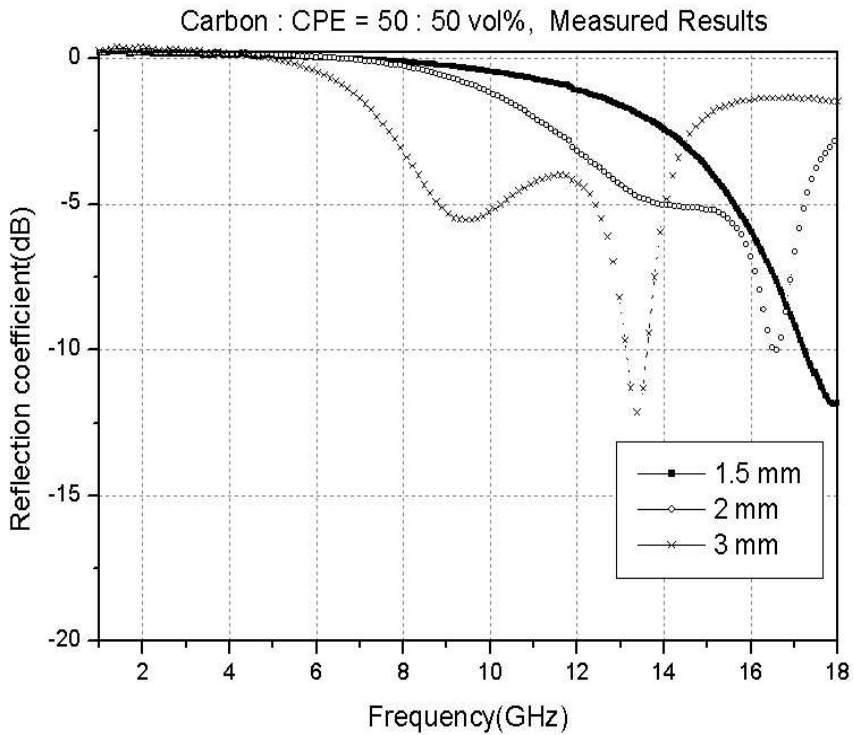


그림 5.8 실측치(카본:CPE=50:50 vol.%)  
 Fig. 5.8 Measured results(Carbon:CPE=50:50 vol.%)

그림 5.9는 조성비가 카본 : CPE = 60 : 40 vol.%이고, 두께 1.5 mm, 2 mm, 3 mm 일 때의 반사계수를 나타낸다.

조성비가 카본 : CPE = 60 : 40 vol.% 에서는 특정 주파수대에서 우수한 전파흡수 특성을 나타내었다.

두께 1.5 mm 에서 주파수 13 GHz ~ 18 GHz 까지 반사계수가 -10 dB 이상으로 측정되었고, 두께 2 mm 에서 주파수 9.2 GHz ~ 14.7 GHz 까지 반사계수가 -10 dB 이상 측정되었으며, 두께 3 mm 에서 주파수 5.4 GHz ~ 11.6 GHz 까지 반사계수 -7 dB 이상으로 측정되었다.

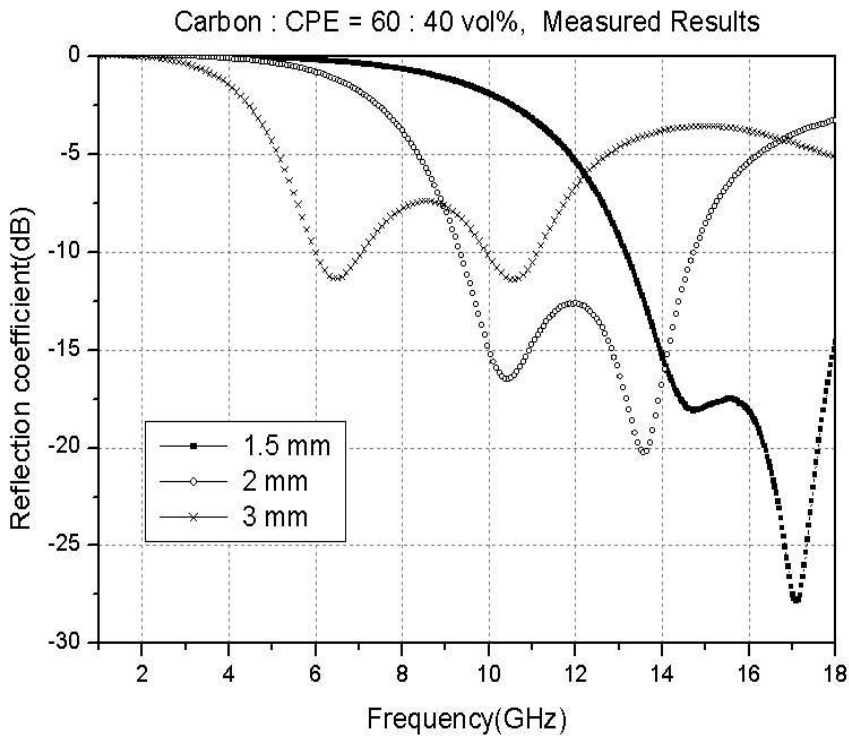


그림 5.9 실측치(카본:CPE=60:40 vol.%)  
Fig. 5.9 Measured results(Carbon:CPE=60:40 vol.%)

그림 5.10은 조성비가 카본 : CPE = 70 : 30 vol.%이고, 두께 1.5 mm, 2 mm, 3mm 일 때의 반사계수를 나타낸다.

조성비가 카본 : CPE = 70 : 30 vol.%의 실측정 값은 두께 1.5 mm에서 주파수 14.6 GHz ~ 16.8 GHz 까지 반사계수가 -10 dB 이상으로 측정되었으며, 두께 2 mm에서 주파수 8.9 GHz ~ 12 GHz 까지 반사계수가 -10 dB 이상으로 측정되었고, 두께 3 mm에서 주파수 6 GHz ~ 7.8 GHz 까지 반사계수가 -10 dB 이상으로 측정되었다.

제작된 전파흡수체의 실측정 반사계수 값에서도 카본의 함유량이 60 vol.% 까지 증가할수록, 반사계수가 증가하는 현상이 나타났으며 정합주파수가 저주파 영역으로 이동하는 현상이 나타났다. 또한 같은 함유량에서는 두께가 두꺼워질수록 저주파 영역으로 정합주파수가 이동하는 현상을 볼 수 있다.

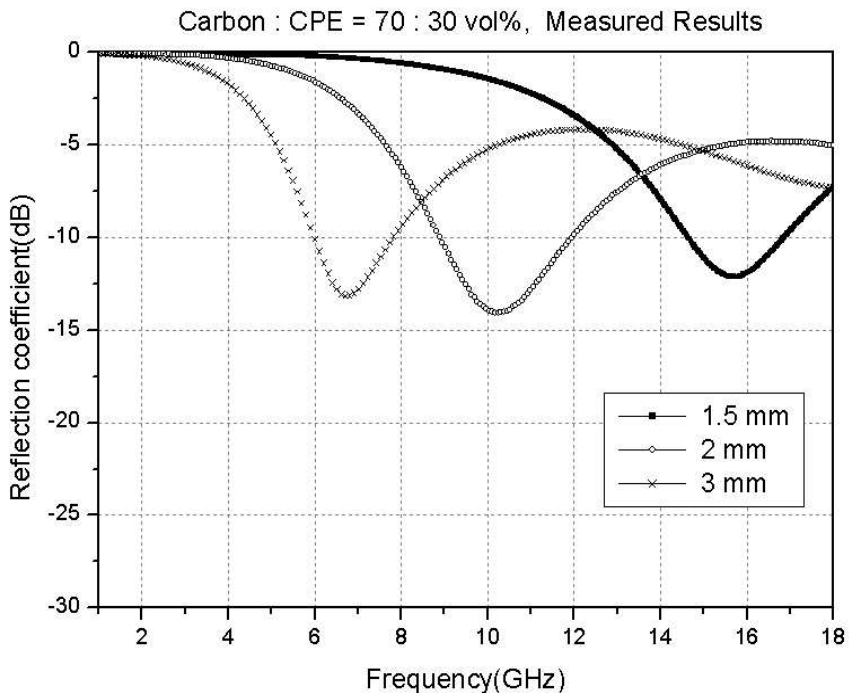


그림 5.10 실측치(카본:CPE=70:30 vol.%)  
 Fig. 5.10 Measured results(Carbon:CPE=70:30 vol.%)

### 5.1.3 시뮬레이션 값과 실측치 비교

전파흡수체의 조성비와 두께에 따른 전파흡수능의 변화를 시뮬레이션한 결과와 시뮬레이션에 의해 실제로 제작한 전파흡수체의 전파흡수능을 측정하여 그림 5.11 ~ 5.25에 나타내었다.

그림 5.11 ~ 5.13은 조성비가 카본 : CPE = 30 : 70 vol.%로 두께 1.5 mm, 2 mm, 3 mm 에서 시뮬레이션과 실측정 반사계수 값을 비교한 그림이다.

시뮬레이션 값과 실측정 값이 두께 1.5 mm, 2 mm, 3 mm 모두 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

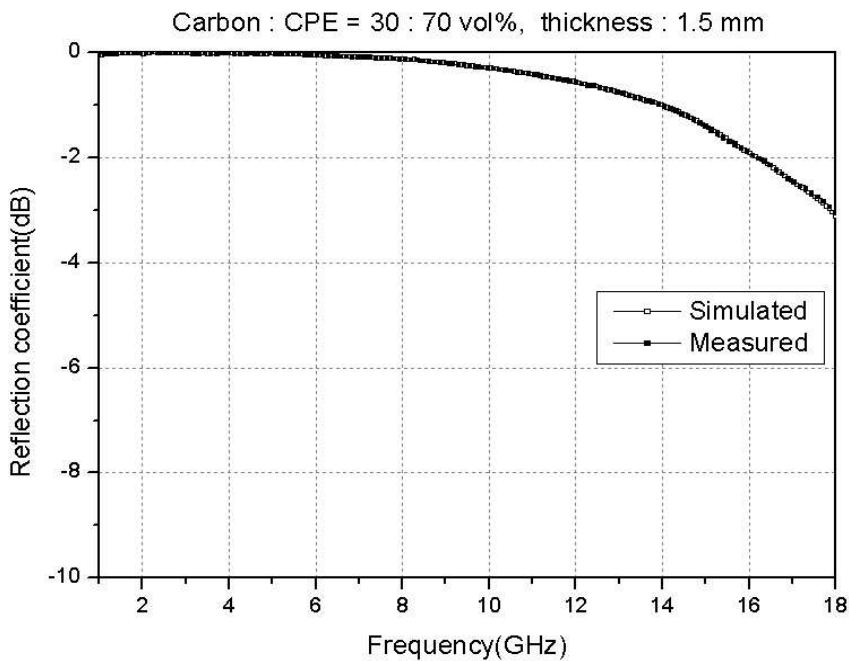


그림 5.11 시뮬레이션 값과 측정 값의 비교(두께:1.5 mm)

Fig. 5.11 Comparison of simulated and measured results  
(Thickness:1.5 mm)

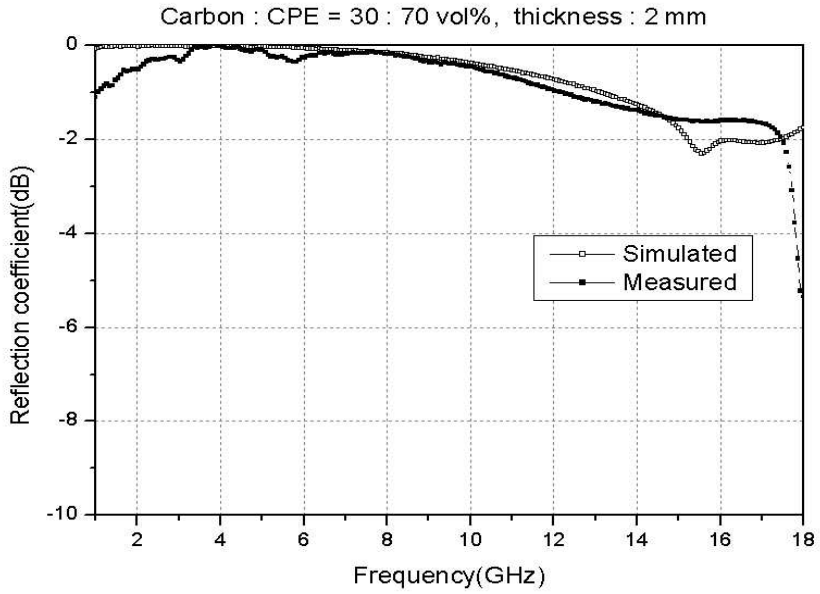


그림 5.12 시뮬레이션 값과 측정 값의 비교(두께:2 mm)  
 Fig. 5.12 Comparison of simulated and measured results  
 (Thickness:2 mm)

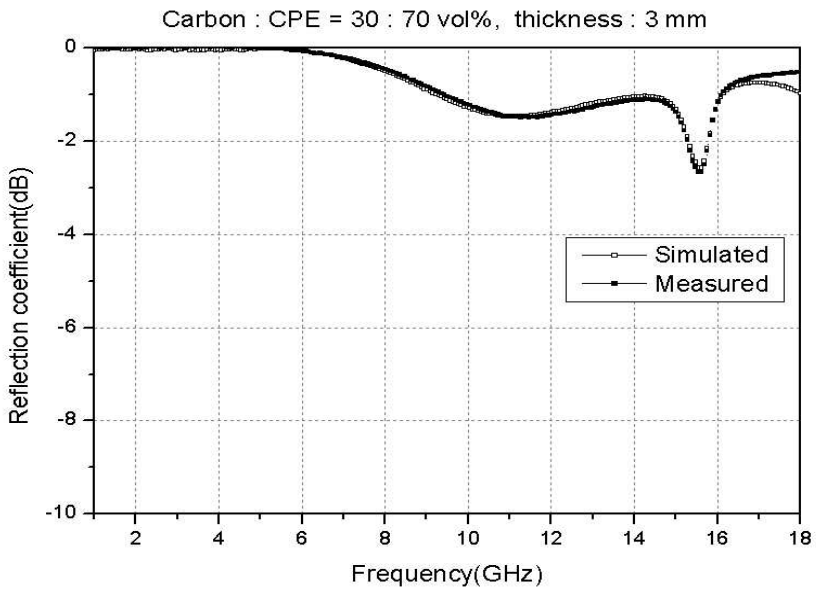


그림 5.13 시뮬레이션 값과 측정 값의 비교(두께:3 mm)  
 Fig. 5.13 Comparison of simulated and measured results  
 (Thickness:3 mm)



그림 5.14 ~ 5.16은 조성비가 카본 : CPE = 40 : 60 vol.%로 두께 1.5 mm, 2 mm, 3 mm 에서 시뮬레이션과 실측정 반사계수 값을 비교한 그림이다.

조성비가 카본 : CPE = 40 : 60 vol.%의 시뮬레이션 값과 실측정 값은 두께 1.5 mm ~ 3 mm까지 모두 반사계수가 -3 dB 이하로, 주파수가 17 GHz ~ 18 GHz에서 -5 dB 이상으로 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

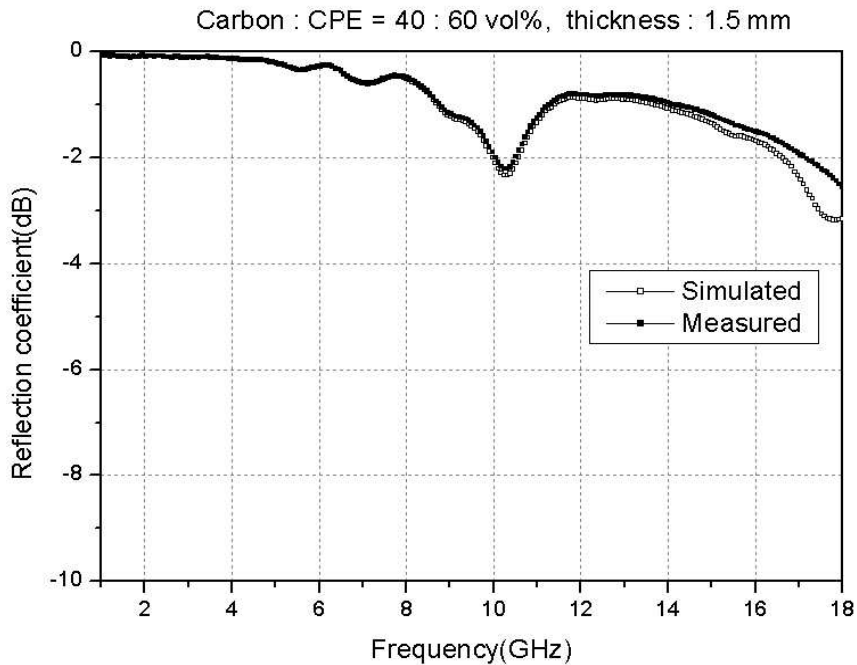


그림 5.14 시뮬레이션 값과 측정 값의 비교(두께:1.5 mm)

Fig. 5.14 Comparison of simulated and measured results  
(Thickness:1.5 mm)

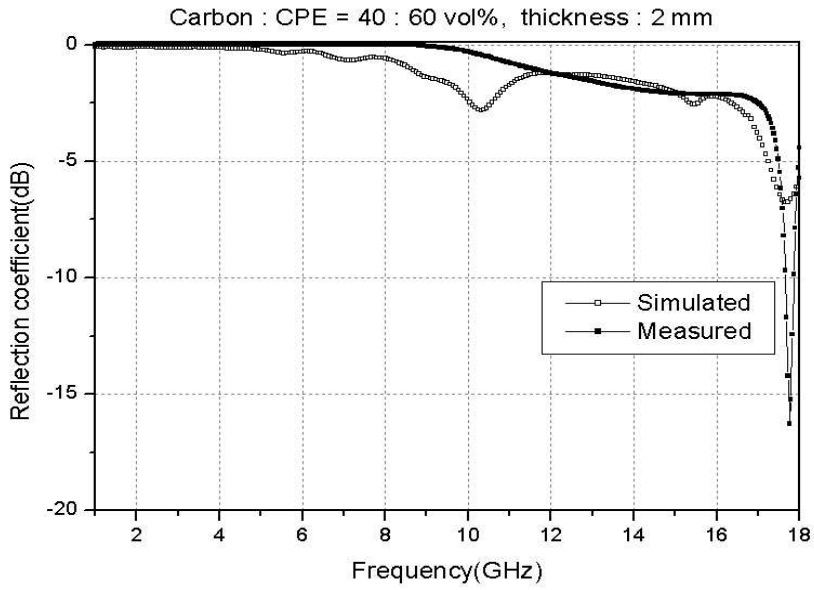


그림 5.15 시뮬레이션 값과 측정 값의 비교(두께:2 mm)  
 Fig. 5.15 Comparison of simulated and measured results  
 (Thickness:2 mm)

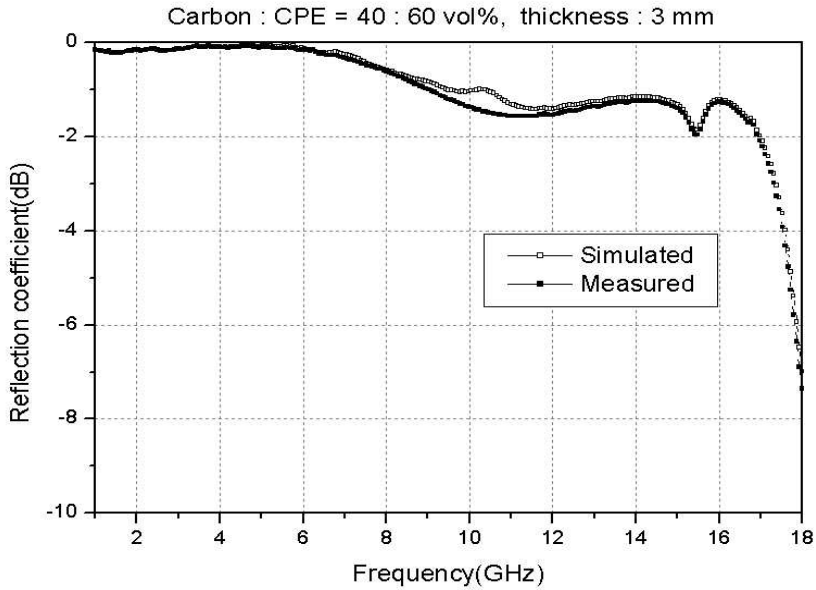


그림 5.16 시뮬레이션 값과 측정 값의 비교(두께:3 mm)  
 Fig. 5.16 Comparison of simulated and measured results  
 (Thickness:3 mm)

그림 5.17 ~ 5.19는 조성비가 카본 : CPE = 50 : 50 vol.%로 두께 1.5 mm, 2 mm, 3 mm 에서 시뮬레이션과 실측정 반사계수 값을 비교한 그림이다.

조성비가 카본 : CPE = 50 : 50 vol.%의 시뮬레이션 값과 실측정 값은 두께 1.5 mm에서 주파수 15.5 GHz ~ 18 GHz 까지 반사계수가 -5 dB 이상, 두께 2 mm에서 주파수 14 GHz ~ 17.2 GHz 까지 반사계수가 -5 dB 이상, 두께 3 mm에서 주파수 8.6 GHz ~ 14.2 GHz 까지 반사계수 -4 dB 이상으로 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

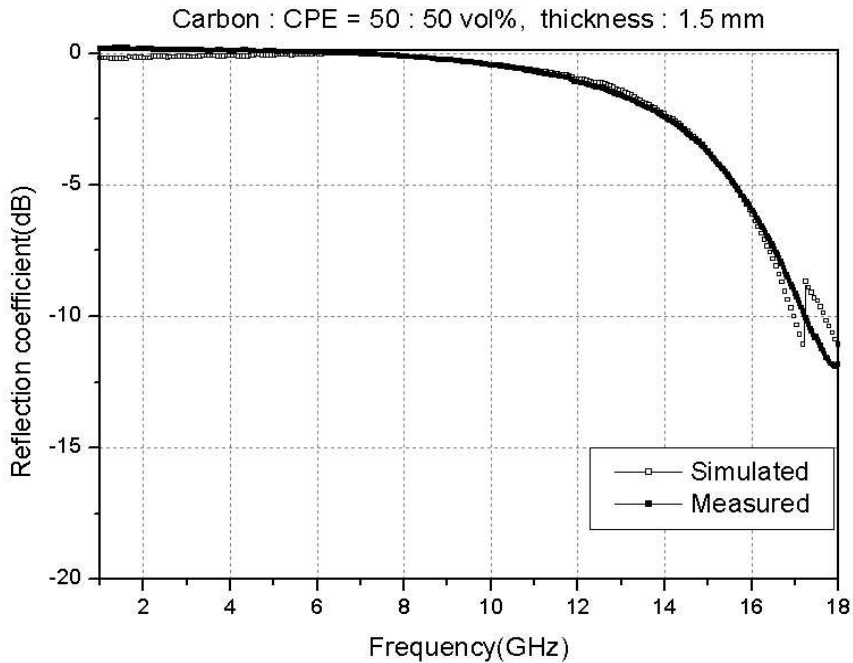


그림 5.17 시뮬레이션 값과 측정 값의 비교(두께:1.5 mm)

Fig. 5.17 Comparison of simulated and measured results  
(Thickness:1.5 mm)

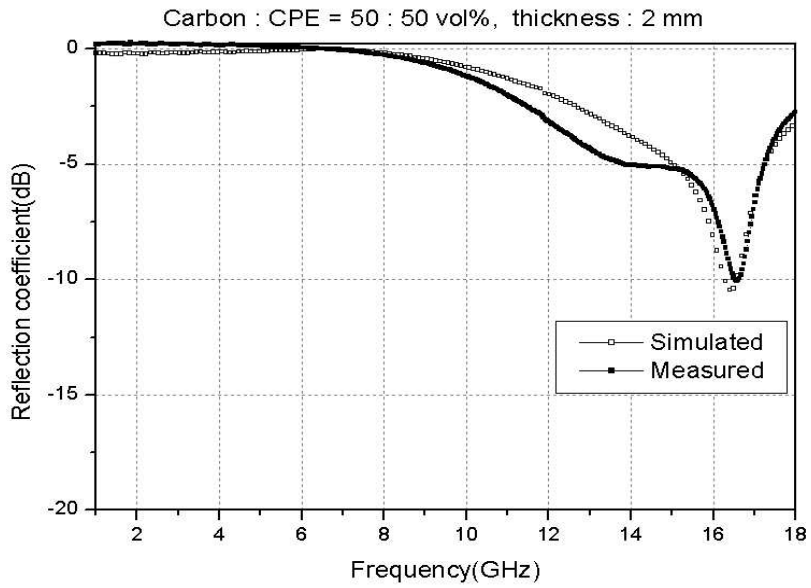


그림 5.18 시뮬레이션 값과 측정 값의 비교(두께:2 mm)  
 Fig. 5.18 Comparison of simulated and measured results  
 (Thickness:2 mm)

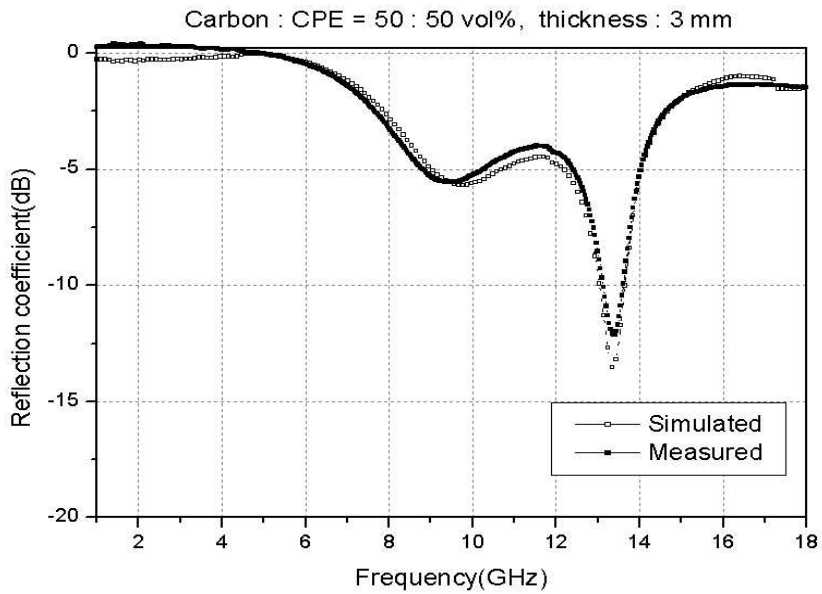


그림 5.19 시뮬레이션 값과 측정 값의 비교(두께:3 mm)  
 Fig. 5.19 Comparison of simulated and measured results  
 (Thickness:3 mm)

그림 5.20 ~ 5.22는 조성비가 카본 : CPE = 60 : 40 vol.%로 두께 1.5 mm, 2 mm, 3 mm 에서 시뮬레이션과 실측정 반사계수 값을 비교한 그림이다.

조성비가 카본 : CPE = 60 : 40 vol.% 에서는 특정 주파수대에서 우수한 전파흡수 특성을 보였다.

두께 1.5 mm에서 주파수 13 GHz ~ 18 GHz 까지 반사계수가 -10 dB 이상, 두께 2 mm에서 주파수 9.2 GHz ~ 14.5 GHz 까지 반사계수가 -10 dB 이상, 두께 3 mm에서 주파수 5.4 GHz ~ 11.6 GHz 까지 반사계수가 -7 dB 이상으로 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

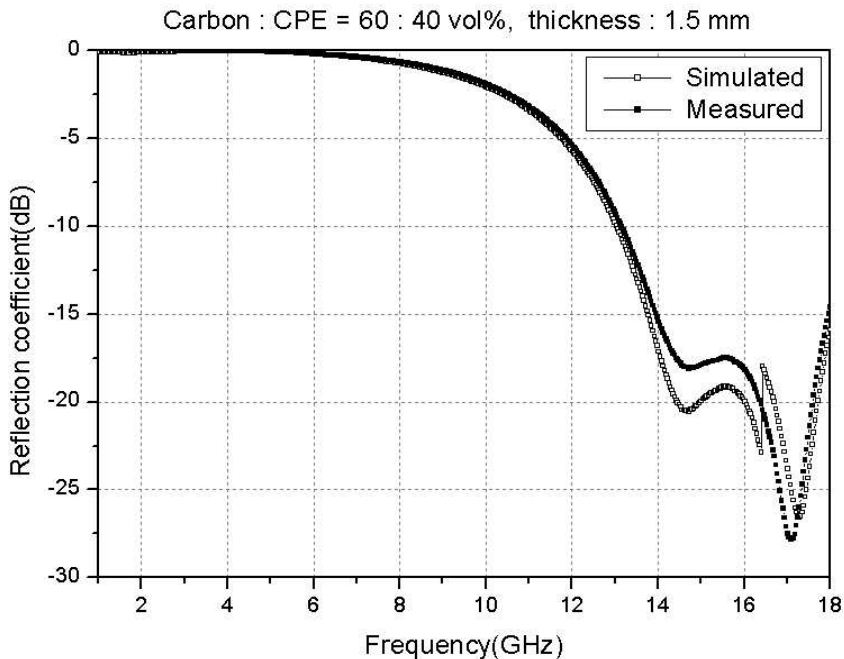


그림 5.20 시뮬레이션 값과 측정 값의 비교(두께:1.5 mm)

Fig. 5.20 Comparison of simulated and measured results  
(Thickness:1.5 mm)

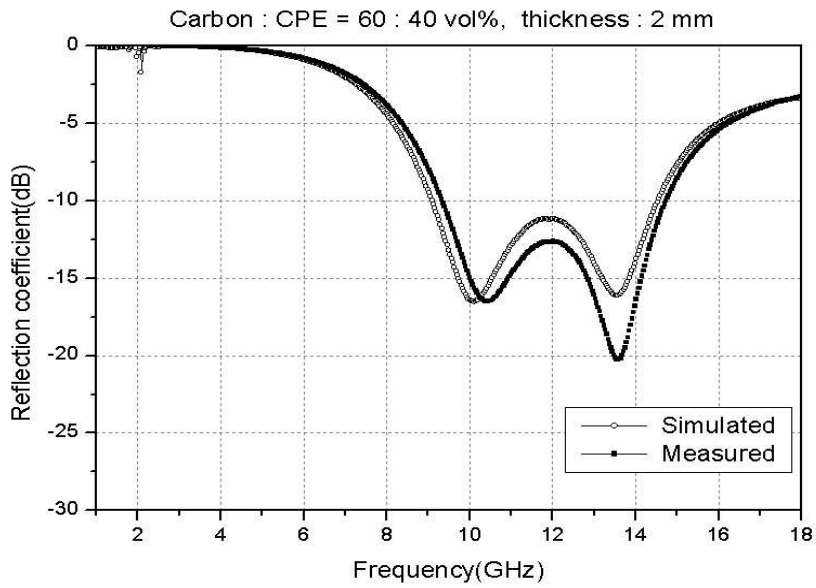


그림 5.21 시뮬레이션 값과 측정 값의 비교(두께:2 mm)  
 Fig. 5.21 Comparison of simulated and measured results  
 (Thickness:2 mm)

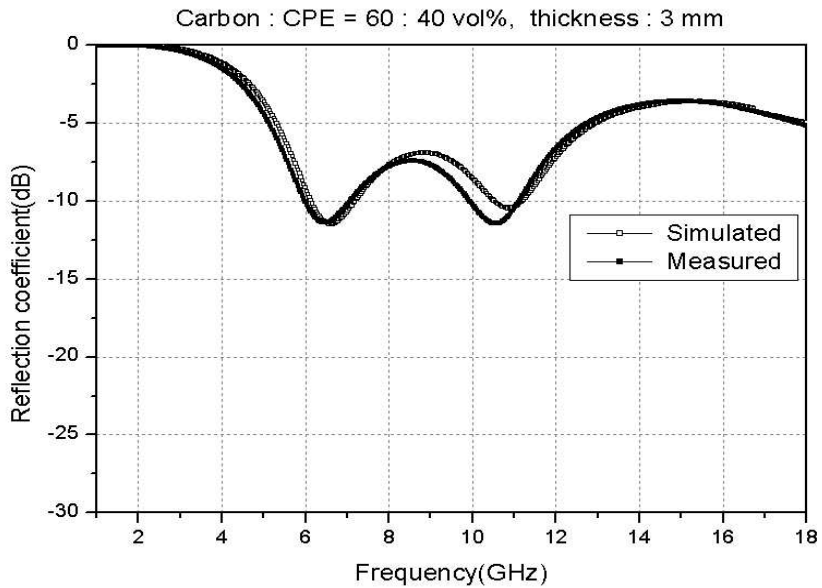


그림 5.22 시뮬레이션 값과 측정 값의 비교(두께:3 mm)  
 Fig. 5.22 Comparison of simulated and measured results  
 (Thickness:3 mm)

그림 5.23 ~ 5.25는 조성비가 카본 : CPE = 70 : 30 vol.%로 두께 1.5 mm, 2 mm, 3 mm 에서 시뮬레이션과 실측정 반사계수 값을 비교한 그림이다.

조성비가 카본 : CPE = 70 : 30 vol.%의 시뮬레이션 값과 실측정 값은 두께 1.5 mm에서 주파수 14.6 GHz ~ 16.8 GHz 까지 반사계수가 -10 dB 이상, 두께 2 mm에서 주파수 8.9 GHz ~ 12 GHz 까지 반사계수가 -10 dB 이상, 두께 3 mm에서 주파수 6 GHz ~ 7.8 GHz 까지 반사계수가 -10 dB 이상으로 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

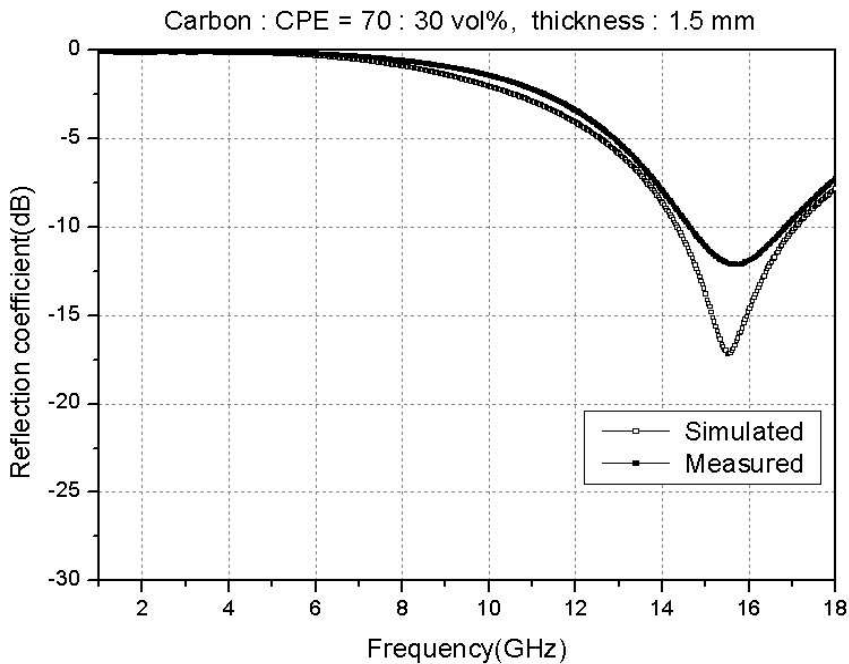


그림 5.23 시뮬레이션 값과 측정 값의 비교(두께:1.5 mm)

Fig. 5.23 Comparison of simulated and measured results  
(Thickness:1.5 mm)

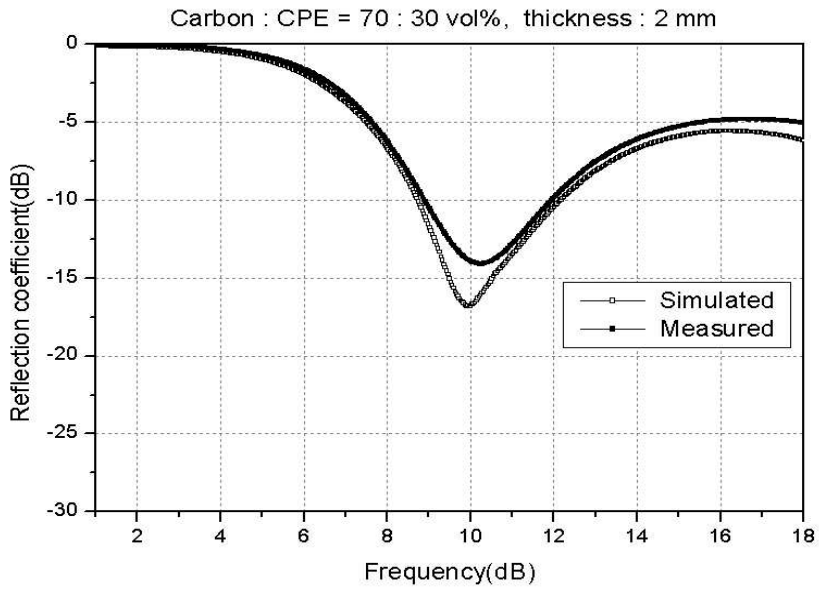


그림 5.24 시뮬레이션 값과 측정 값의 비교(두께:2 mm)  
 Fig. 5.24 Comparison of simulated and measured results  
 (Thickness:2 mm)

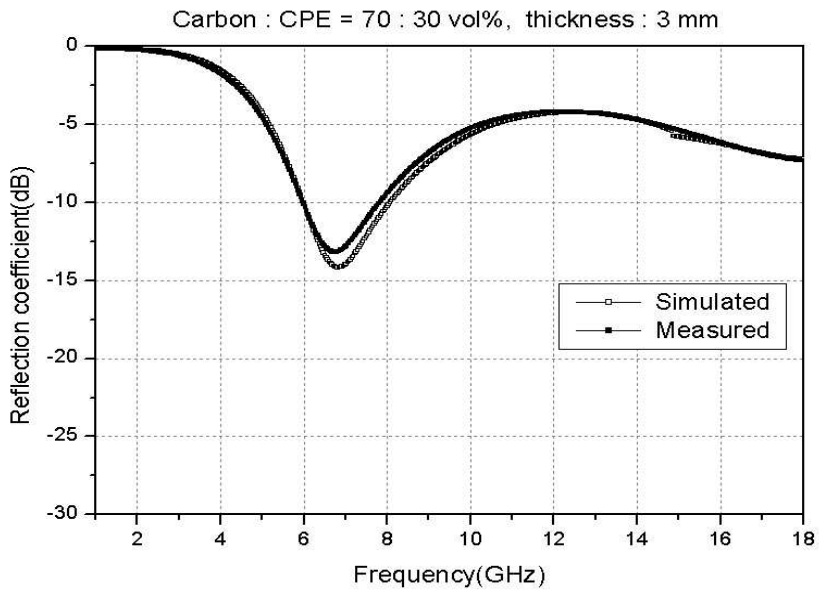


그림 5.25 시뮬레이션 값과 측정 값의 비교(두께:3 mm)  
 Fig. 5.25 Comparison of simulated and measured results  
 (Thickness:3 mm)



## 5.2 2층형일 경우

광대역특성을 가지는 전파흡수체를 실현하기 위해서는 2층으로 구성할 필요가 있다. 즉, 다층으로 구성함으로써 흡수체의 표면 가까이에서는 그 재료정수가 공기에 가까운 재료를 선택하고, 내부로 들어 갈수록 전파흡수율이 큰 재료로 구성한다. 이와 같이 구성함으로써 전파는 주파수가 다소 변화한다 해도 재료 내에 투과하고, 그 후에 천천히 감쇠하게 된다. 이러한 관점에서 다층으로 구성함에 있어서는 전파흡수체를 구성하는 재료뿐만 아니라 전파흡수체의 형상도 중요하지만, 본 논문에서는 카본을 이용한 전파흡수체 중에서 재료정수를 이용하여 Sheet형으로 최적의 전파흡수체를 설계하였다.

설계이론은 단층형과 같은 방법으로 2층에서의 재료정수를 식 (2.37)에 대입하여 2층에서의 임피던스  $Z_2$ 을 구하고, 식 (2.39)에 대입해서 반사계수를 구한다.

### 5.2.1 시뮬레이션 결과

전파흡수체를 광대역화 하기 위해서 재료정수가 서로 다른 전파흡수체를 적층하여 2층형 전파흡수체를 제작할 때 적층의 순서에 따라서 전파흡수능이 많이 달라진다. 따라서 적층의 순서를 결정하기 위해서 시뮬레이션을 하고 결정된 순서로 적층형 광대역 전파흡수체를 시뮬레이션 하였다.

적층에 사용한 전파흡수체 시트는 공기 중의 임피던스와 전파흡수체의 임피던스 매칭고려, 조성비가 카본 : CPE = 60 : 40 vol.% ~ 70 : 30 vol.%인 시트를 사용하였으며, 조성비가 카본 : CPE = 20 : 80 vol.% ~ 50 : 50 vol.%는 전파흡수능이 적게 나왔으며, 표면저항이 측정기기의 측정 한계치를 초과하였기 때문에 사용하지 않았다.

적층 순서는 공기 중의 임피던스와 전파흡수체의 임피던스 매칭이 잘 되어진 조성비 카본 : CPE = 60 : 40 vol.%의 시트가 표면에 위치하고, 조성비가 카본 : CPE = 70 : 30 vol.%의 시트가 금속판 쪽에 위치할 때, X-band 전 대역에서 높은 전파흡수능이 예측되었으며, 특히 두께 2.5 mm에서 더욱 높은 전파흡수능이 예측되었다.

그림 5.26은 두께 3 mm의 2층형 전파흡수체의 시뮬레이션 반사계수 값이며, 적층순서는 조성비가 카본 : CPE = 70 : 30 vol.%인 시트 1.5 mm를 금속판 쪽에 조성비가 카본 : CPE = 60 : 40 vol.%인 시트 1.5 mm를 표면 쪽에 적층하였다.

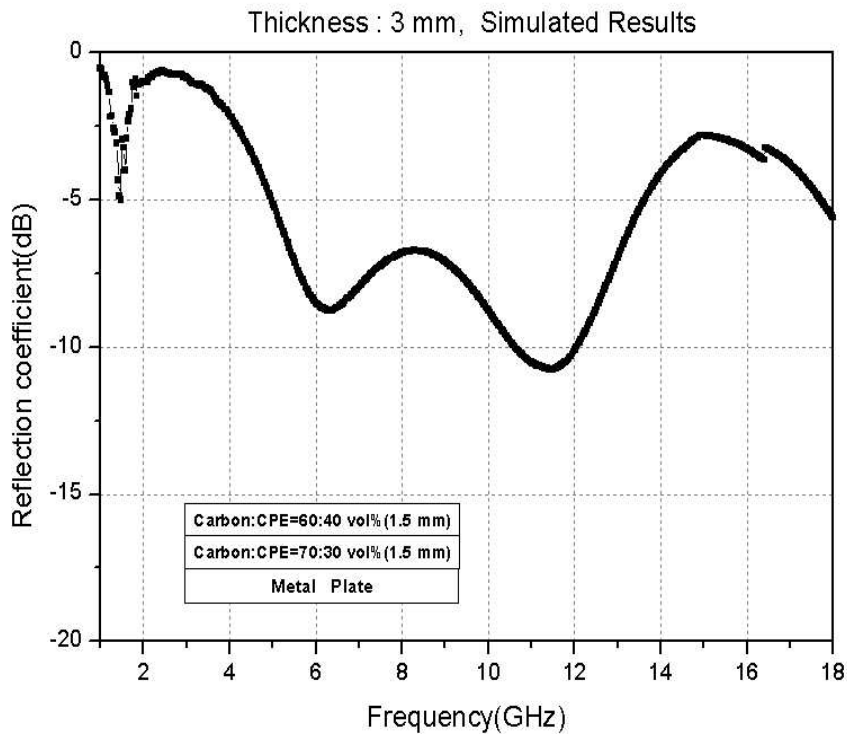


그림 5.26 2층형 전파흡수체의 시뮬레이션 값(두께:3 mm)

Fig. 5.26 Simulated results of two-layer absorber (Thickness:3 mm)

그림 5.27은 두께 2.5 mm의 2층형 전파흡수체의 시뮬레이션 반사계수 값이며, 적층순서는 조성비가 카본 : CPE = 70 : 30 vol.%인 시트 1 mm를 금속판 쪽에 조성비가 카본 : CPE가 60 : 40 vol.%인 시트 1.5 mm를 표면 쪽에 적층하였다. 시뮬레이션 결과 X-band 주파수 전 대역에서 10 dB 이상의 높은 전파 흡수능을 보여주었다.

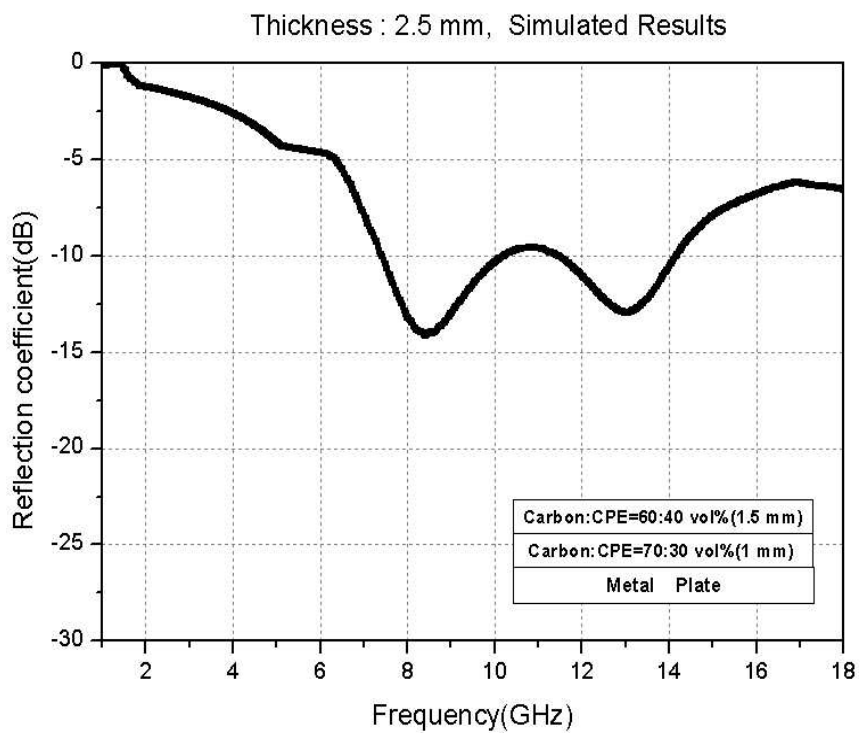


그림 5.27 2층형 전파흡수체의 시뮬레이션 값(두께:2.5 mm)

Fig. 5.27 Simulated results of two-layer absorber  
(Thickness:2.5 mm)

## 5.2.2 실측정 결과

시뮬레이션에 의해 결정된 적층의 순서에 맞추어 두께 3 mm, 2.5 mm의 전파흡수체를 제작하고 각각의 반사계수를 측정하여 그림 5.28 ~ 그림 5.29에 나타내었다.

그림 5.28은 조성비가 카본 : CPE = 70 : 30 vol.%인 시트 1.5 mm를 금속판 쪽에 조성비가 카본 : CPE = 60 : 40 vol.%인 시트 1.5 mm를 표면 쪽에 적층하여 제작한 두께 3 mm의 2층형 전파흡수체의 측정 반사계수이며, 전파흡수능 10 dB 이상을 만족하는 주파수 대역이 7 GHz ~ 11.7 GHz 이다.

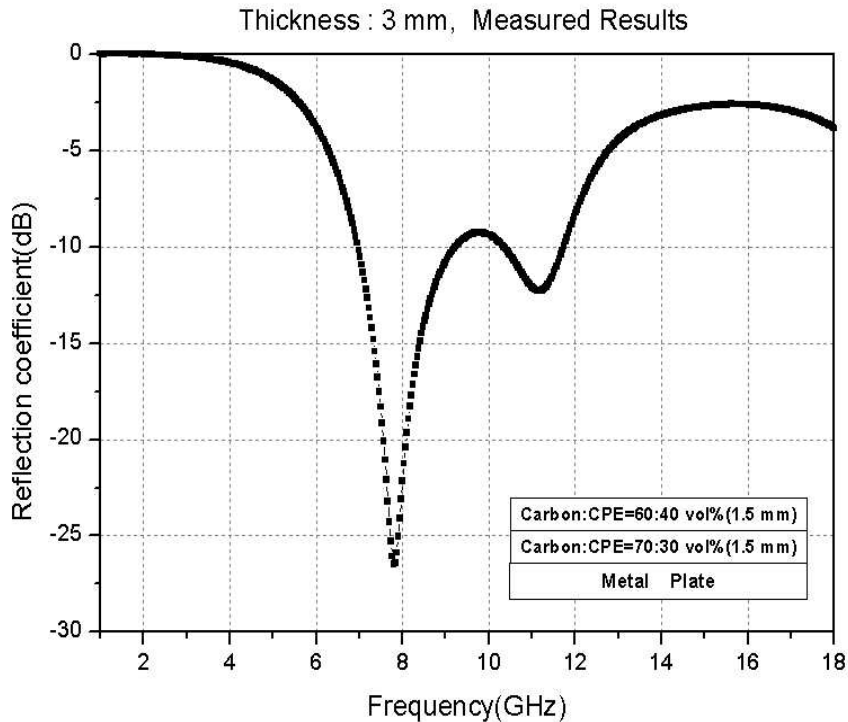


그림 5.28 2층형 전파흡수체의 측정값(두께:3 mm)  
 Fig. 5.28 Measured results of two-layer absorber  
 (Thickness:3 mm)

그림 5.29는 조성비가 카본 : CPE = 70 : 30 vol.%인 시트 1 mm를 금속판 쪽에 조성비가 카본 : CPE = 60 : 40 vol.%인 시트 1.5 mm를 표면 쪽에 적층하여 제작한 두께 2.5 mm의 2층형 전파흡수체의 측정 반사계수이며, 전파흡수능 10 dB 이상을 만족하는 주파수 대역이 7.8 GHz ~ 13.3 GHz 로 X-Band 전 주파수 대역에서 특성이 나타난다.

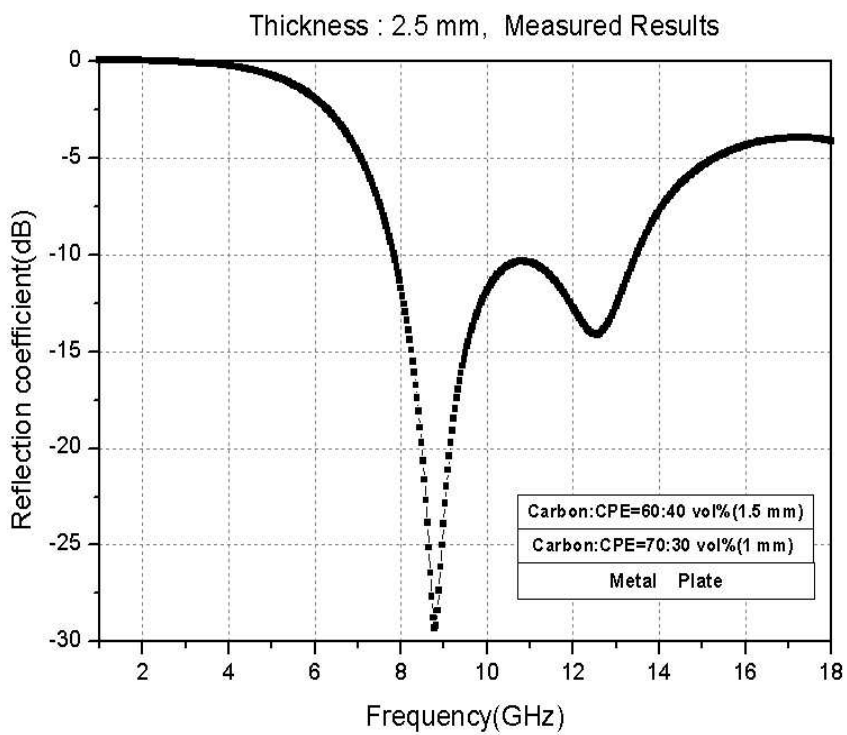


그림 5.29 2층형 전파흡수체의 측정값(두께:2.5 mm)  
 Fig. 5.29 Measured results of two-layer absorber  
 (Thickness:2.5 mm)

### 5.2.3 시뮬레이션 값과 실측치 비교

조성비가 카본 : CPE = 70 : 30 vol.%인 시트를 금속판에 먼저 적층하고 그 위에 조성비가 카본 : CPE = 60 : 40 vol.%인 시트를 적층하여 각각 두께 3 mm, 2.5 mm의 2층형 전파흡수체의 시뮬레이션 반사계수와 실측정 반사계수를 비교하여 그림 5.30과 그림 5.31에 나타내었다. 비교결과 일부대역에서는 실측정 반사계수가 더 낮은 값, 즉 높은 전파흡수능을 보이지만 전반적인 패턴은 일치함을 볼 수 있었다.

특히, 금속판 위에 조성비가 카본 : CPE = 70 : 30 vol.%이고, 두께가 1 mm 시트와 조성비가 카본 : CPE = 60 : 40 vol.%이고 두께가 1.5 mm인 시트를 적층하였을 때, 두께 2.5 mm에서 X-Band 전 주파수 대역에서 10 dB 이상의 전파흡수능을 보여주고 있다.

그림 5.30은 조성비가 카본 : CPE = 70 : 30 vol.%이고 두께가 1.5 mm인 시트를 금속판 쪽에 조성비가 카본 : CPE = 60 : 40 vol.%이고 두께가 1.5 mm인 시트를 표면 쪽에 적층하여 제작한 두께 3 mm의 2층형 전파흡수체의 시뮬레이션 반사계수와 실 측정 반사계수 비교 그림이다.

그림 5.31은 조성비가 카본 : CPE = 70 : 30 vol.%이고 두께가 1 mm인 시트를 금속판 쪽에 조성비가 카본 : CPE = 60 : 40 vol.%이고 두께가 1.5 mm인 시트를 표면 쪽에 적층하여 제작한 두께 2.5 mm의 2층형 전파흡수체의 시뮬레이션 반사계수와 실측정 반사계수 비교 그림이다. 이 경우 연구목표에 부합되는 결과를 나타냄을 알 수 있다.

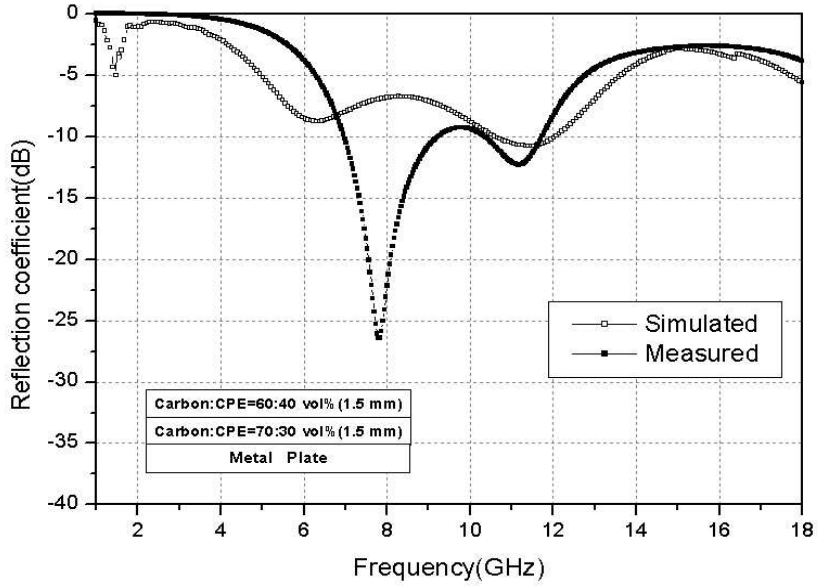


그림 5.30 시뮬레이션 값과 측정 값 비교(두께:3 mm)  
 Fig. 5.30 Comparison of simulated and measured results  
 (Thickness:3 mm)

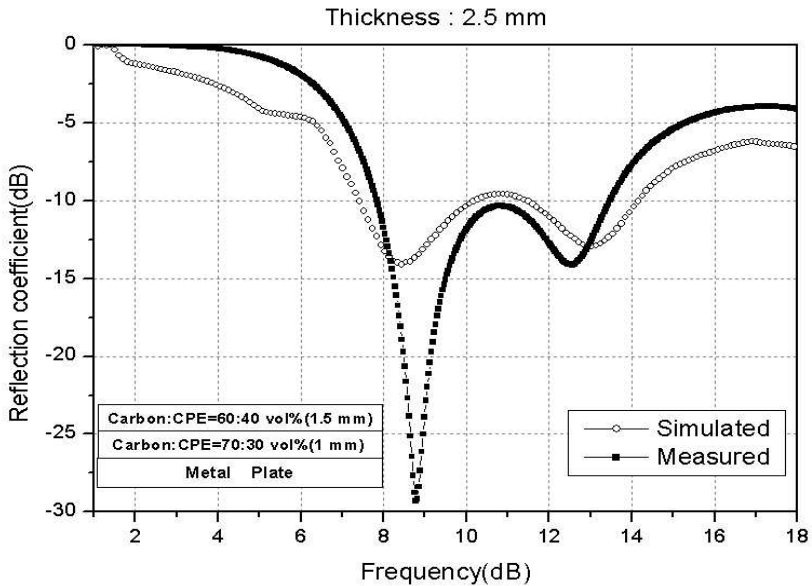


그림 5.31 시뮬레이션 값과 측정 값 비교(두께:2.5 mm)  
 Fig. 5.31 Comparison of simulated and measured results  
 (Thickness:2.5 mm)

### 5.3 3층형일 경우의 시뮬레이션 결과

광대역특성을 가지는 전파흡수체를 실현하기 위해 3층으로 구성하였다. 3층으로 구성함으로써 흡수체의 표면 가까이에서는 그 재료정수가 공기에 가까운 재료를 선택하고, 내부로 들어 갈수록 전파흡수율이 큰 재료로 구성한다. 이와 같이 구성함으로써 전파는 재료 내에 전량 투과하여 감쇠하게 된다. 이러한 관점에서 3층으로 구성함에 있어서는 전파흡수체를 구성하는 재료뿐만 아니라 전파흡수체의 형상도 중요하지만, 본 논문에서는 카본을 이용한 전파흡수체 중에서 재료정수를 이용하여 Sheet형으로 최적의 전파흡수체를 설계하였다.

설계이론은 단층형과 같은 방법으로 각 층에서의 재료정수를 식 (2.37)에 대입하여 3층에서의 임피던스  $Z_3$ 을 구하고, 식 (2.39)에 대입해서 반사계수를 구한다.

적층에 사용한 전파흡수체 시트는 공기 중의 임피던스와 전파흡수체의 임피던스 매칭고려, 조성비가 카본 : CPE = 60 : 40 vol.% ~ 70 : 30 vol.%인 시트를 사용하였으며, 조성비가 카본 : CPE = 20 : 80 vol.% ~ 50 : 50 vol.%는 전파흡수능이 적게 나왔으며, 표면저항이 측정기기의 한계치를 초과하였기 때문에 사용하지 않았다.

적층 순서는 공기 중의 임피던스와 전파흡수체의 임피던스 매칭이 잘 되어진 조성비 카본 : CPE = 60 : 40 vol.%의 시트가 표면에 위치하고, 조성비가 카본 : CPE = 70 : 30 vol.%의 시트가 중간에, 그리고 조성비 카본 : CPE = 60 : 40 vol.%의 시트가 금속판 쪽에 위치할 때, X-band 전 대역 및 일부 Ku-band에서 높은 전파흡수능이 예측되었다

그림 5.32는 두께 2.5 mm의 3층형 전파흡수체의 시뮬레이션 반사계수 값이며, 주파수 7 GHz ~ 14.2 GHz, 16.4 GHz ~ 18 GHz에서 10 dB 이상의 높은 전파흡수능이 예측되었다.

그림 5.33은 두께 2.5 mm의 2층형 전파흡수체와 3층형 전파흡수체의 시뮬레이션 반사계수 값을 비교한 것이다. 2층형 전파흡수체보다 3층형 전파흡수체의 시뮬레이션 반사계수 값이 일부 C-band 및 Ku-band에서 향상되었음을 알 수 있다.



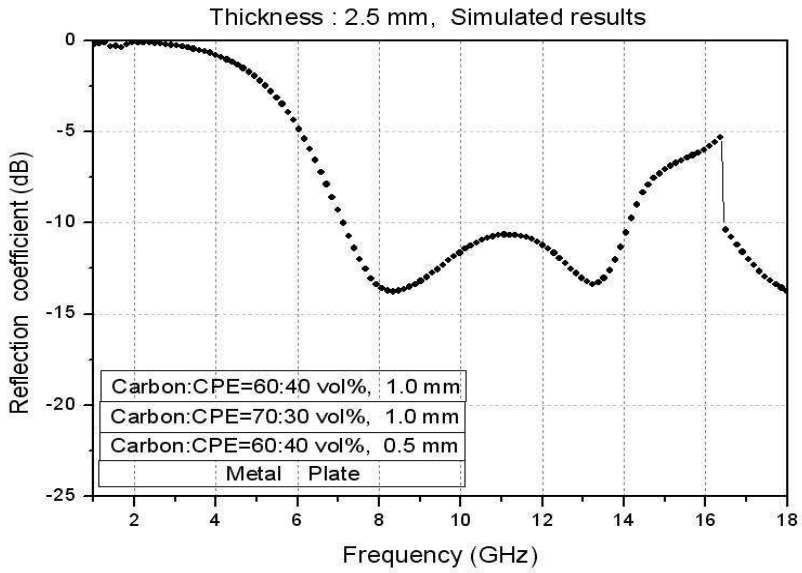


그림 5.32 3층형 전파흡수체의 시뮬레이션 값(두께:2.5 mm)  
 Fig. 5.32 Simulated results of three-layer absorber  
 (Thickness:2.5 mm)

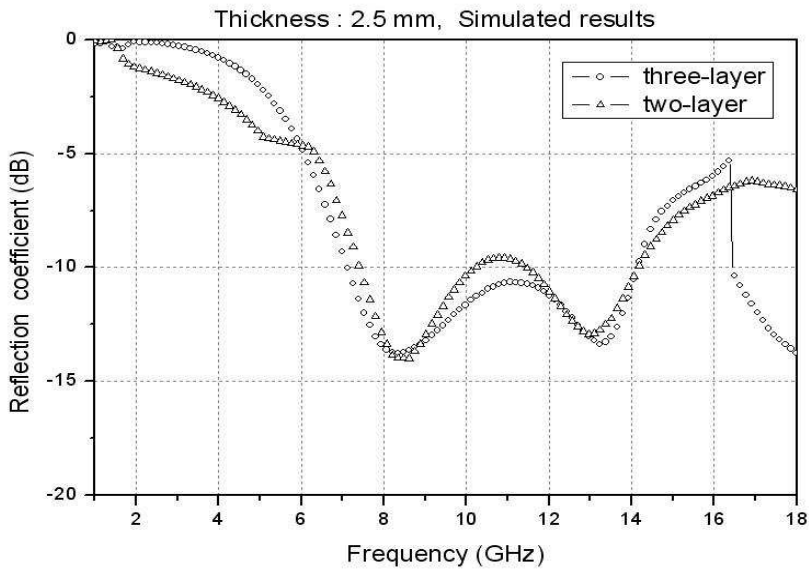


그림 5.33 2층형과 3층형 전파흡수체의 시뮬레이션 값  
 (두께:2.5 mm)  
 Fig. 5.33 Simulated results of two-layer and three-layer  
 absorber (Thickness:2.5 mm)

## 제 6 장 결 론

최근 전자파환경공학에 대한 연구의 진전과 더불어 전자파환경의 엄격한 규제 때문에 전파흡수체의 응용범위도 점차 확대되고 있다. 특히, 각종 전자기기로부터 누설되는 불요전자파를 억제하는 EMI/EMC 대책 등에서의 응용이 활발히 진행되고 있다. 지금까지 본 논문에서 전파흡수체에 대한 연구결과는 다음과 같다.

1. 전파흡수원리에서 도전손실이나 유전손실에 비해 자성손실이 크기 때문에 GHz 대역에서는 ferrite 같은 자성손실 재료를 이용하여 연구가 많이 수행되고 있으며, 특히 MnZn ferrite나 NiZn ferrite 같은 soft ferrites와 Sr ferrite나 Ba ferrite 같은 hard ferrites가 GHz 대역에서 자기적 손실이 증가되어 전파흡수체 재료로서 널리 이용되고 있다. 그러나 본 논문에서는 도전손실 재료인 카본을 이용하여 GHz 대역용 전파흡수체 개발 가능성을 보였다.
2. 카본을 주재료로 사용하고 CPE를 지지체로 사용하여 각각 5가지 조성비로 전파흡수체 샘플을 제작하여 전파흡수능을 분석한 결과 카본의 함유량이 60 vol.%까지 증가함에 따라 전파흡수능이 증가하며, 정합주파수가 저주파 대역으로 이동하는 것을 확인하였다.
3. 표면저항측정기(four-point probe)를 이용하여 5가지 조성비로 제작한 전파흡수체의 표면저항을 측정된 결과, 카본의 함유량이 50 vol.% 이상 일 경우 표면저항을 측정 가능하였으며, 카본 함유량이 60 vol.% 일 때 평균 표면저항이  $297 \Omega/\square$  로 다른 조성비의 전파흡수체보다 공기 중의 임피던스와 전파흡수체의 임피던스 매칭이 잘 된 것으로 확인하였다. 따라서 2층 전파흡수체로 적층할 때 카본 함유량이 60 vol.% 인 전파흡수체가 표면으로 위치해야 됨을 확인하였다.

4. Network Analyzer를 이용하여 샘플로부터 입력임피던스를 측정하고, MatLab 프로그램을 이용하여 도출된 재료정수로 시뮬레이션을 통한 단층형 전파흡수체를 설계한 결과와 실제 제작하여 측정한 결과가 잘 일치하는 것을 보았다. 그리고 전파흡수체를 광대역화하기 위해 단층형 전파흡수체를 임피던스 매칭을 고려하여 시뮬레이션을 통한 2층형 전파흡수체를 설계한 결과와 실제 제작하여 측정한 결과도 잘 일치하는 것을 보았으며, 두께 2.5 mm로 X-Band 전 주파수 대역에 대하여 10 dB 이상의 전파흡수 특성을 가지는 것을 확인하였다.

## 참 고 문 헌

- [1] 김동일, 전상엽, "EMI/EMC 대책용 광대역화 전파흡수체의 개발에 관한 연구," 한국향해학회지 제15권, 제4호, pp.13-35, 1991, 12.
- [2] 강덕근, "새로운 전자파장해관련 기준 재/개정," 전파진흥지, pp.11-16, 1996. 11.
- [3] 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.
- [4] 김동일, 김민석, 정세모, "전파무향실의 평가에 관한 연구," 한국향해학회지 제19권 제1호, pp.9-16, 1995.
- [5] 김동일, 이창우, 전상엽, 정세모, "초광대역특성을 갖는 정방형 페라이트 기둥구조의 전파흡수체 설계법," 한국향해학회지 제19권 제2호, pp.99-106, 1995.
- [6] 김동일, 박지용, "광대역특성을 갖는 다층구조 페라이트 전파흡수체의 최적 설계," 한국통신학회 부산·경남추계합동학술발표회, pp.58-62, 1996.
- [7] 김동일, 박종구, 원영수, 이영구, 정세모, "원추절단형 및 원기둥형 광대역 페라이트 전파흡수체 개발에 관한 연구," 한국전자과학회논문지, 제11권, 제6호, pp.721-725, 2000. 11.
- [8] Y. Naito et al., "Characteristics of grid ferrite electromagnetic wave Absorber," IEICE of Japan, vol. J76-B-II, No.11, pp. 898-905, Nov. 1993.

- [9] Y. Naito, K. Suetake, "Application of ferrite to electromagnetic wave absorber and its characteristics," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-19, No.1, pp.65-72, Jan. 1971.
- [10] Jae-Man Song, Dong Il Kim, Jeung Hyun Choi, Jae Hyun Jeung, "Electromagnetic wave absorbers papered with alnico magnets," J. Korea Electromagnetic Engineering Soc., vol.5, No.5, pp.117-121, Sep. 2005.
- [11] Sang Hyun Moon, Seung Jae Shin, Jae Man Song, Dong Il Kim, Ki Man Kim, "Development of composite Ba ferrite EM wave absorbers for GHz frequency," J. Korea Electromagnetic Engineering Soc., vol.14, No.12, pp.1329-1334, Dec. 2003.
- [12] 김동일, 전파흡수체공학, 대영사, 2006.
- [13] 김동일, 김민석, 정세모, "전파반무향실의 평가에 관한 연구," 한국향해학회 지 제19권 제1호, pp.9-16, 1995.
- [14] 김동일, 김민석, 정세모, "전파반무향실의 특성평가에 관한 연구," 한국향해학회 '96 춘계 학술 발표회 논문집, pp.93-100, 1996.
- [15] 김동일, 김동철, "전파흡수체의 특성측정기법 및 설계 제작에 관한 연구," 한국향해학회지, 제16권 제4호 pp.35-44, 1992. 12.
- [16] Y. Naito et al., "Anechoic chamber fitted with ferrite grid or ferrite multilayer electromagnetic wave absorbers," EMC'94 ROMA, pp.229-234, Sep. 1994.

- [17] 김동일, 정세모, 안영섭, "전파흡수체의 전자파적 특성측정기법 연구," 한국향해학회지, 제 16 권 제 4 호 pp.25-34, 1992, 12.
- [18] 위탁기술개발과제 최종결과보고서, "초광대역 페라이트 전파흡수체의 설계 기술 개발," 동국산업주식회사, pp.14-17, 2001. 4.
- [19] , 電磁波の吸収と遮蔽, 日經技術圖書(株), pp.129-142, 1989.1.10.
- [20] 内藤喜之, 電波吸収体, OHM社, 1987.
- [21] 橋本 修, 電波吸収体入門, 森北出版株式會社, pp.20-25, 1997.
- [22] Eugene F. Knott, Jone F. Shaeffer, Michael T. Tuley, RADAR CROSS SECTION, Second edition, 2004.
- [23] C. P. Neo, V. K. Varadan, "Optimization of carbon fiber composite for microwave absorber," IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, vol.46, No.1, pp.102-106, Feb. 2004
- [24] 橋本 修, 電波吸収体のはなし, 日刊工業新聞社, pp.6-18, 2001.