

工學碩士 學位論文

Sendust, Carbon 및 $Al(OH)_3$ 混合에 의한
電波吸收性能 向上에 관한 研究

*A Study on the Improvement of EM Wave
Absorption Characteristics with Mixture of
Sendust, Carbon and $Al(OH)_3$*

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

諸 承 勳

本 論 文 을 諸 承 勳 의 工 學 碩 士
學 位 論 文 으 로 認 准 함

委 員 長 : 行 政 學 博 士 金 基 文



委 員 : 工 學 博 士 金 基 萬



委 員 : 工 學 博 士 金 東 一



2007 年 2 月

韓 國 海 洋 大 學 校 大 學 院

電 波 工 學 科

諸 承 勳

목 차

<i>Nomenclature</i>	iii
<i>Abbreviations</i>	v
<i>Abstract</i>	vi
제 1 장 서 론	1
1.1 연구 배경	1
1.2 연구 목적	3
제 2 장 전파흡수체 기초 이론	4
2.1 전파흡수체 기초 이론	4
2.2 전파흡수체의 분류	6
2.2.1 전파흡수 재료에 의한 분류	6
2.2.2 형태에 의한 분류	9
2.2.3 층수에 의한 분류	9
2.3 전파흡수체의 종류	11
2.4 전파흡수체에 요구되는 특성	13
2.5 전파흡수체 분포정수회로화	15
2.5.1 파동방정식(Helmholtz Equation)	15
2.5.2 분포정수회로화	20
2.6 단층형 전파흡수체 및 다층형 전파흡수체	26
2.7 전파흡수체의 반사계수 측정 및 재료정수 측정법	35

제 3 장 전파흡수체의 설계·제작 및 전파흡수성능 평가	40
3.1 전파흡수체의 설계 및 제작	40
3.2 Sendust의 조성비에 따른 전파흡수능	43
3.3 Carbon의 조성비에 따른 전파흡수능	44
3.4 Sendust에 $Al(OH)_3$ 를 혼합한 전파흡수체	46
3.5 Carbon에 $Al(OH)_3$ 를 혼합한 전파흡수체	59
3.6 Sendust의 두께에 따른 전파흡수능	51
3.7 Carbon의 두께에 따른 전파흡수능	52
3.8 2층형 전파흡수체의 시뮬레이션 및 측정결과	53
 제 4 장 결 론	 57
 참고문헌	 59
 발표논문	 61

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
- α : Attenuation constant
- β : Phase constant
- Γ : Reflection coefficient

- γ : Propagation constant
- ε : Permittivity
- ε_{eq} : Equivalent permittivity
- ε_0 : Permittivity of vacuum
- ε_{rn} : Relative permittivity of n_th layer
- λ : Wave length of free space
- μ : Permeability
- μ_{eq} : Equivalent permeability
- μ_0 : Permeability of vacuum
- μ_{rn} : Relative permeability of n_th layer
- σ : Conductivity
- ω : 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

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

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

Unwanted electromagnetic waves leakage from the circuits of communication equipment and electronic equipment can cause a malfunction of the other equipments. Problems regarding EMC are more likely to occur, as smaller, lighter, and more sophisticated electronic equipment, and thus the packaging density of electronic components must be increased drastically. These problems can be eliminated by using EM wave absorbers.

Soft and hard ferrites are well-known as absorption materials for EM wave absorbers. Soft ferrites, such as MnZn ferrite and NiZn 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 high frequency range.

In this thesis, the improvement of EM wave absorption characteristics of the EM wave absorber with mixture of Sendust, and Carbon, $\text{Al}(\text{OH})_3$ was studied and analyzed in the case of a mixture rate of sendust to 75 wt%, 80 wt%, and 85 wt%, and a mixture rate of carbon to 40 wt%, 45 wt%, and 50 wt%. The permittivity and permeability is calculated by the measured data, and the EM wave absorption abilities are simulated according to different thicknesses of the EM wave absorbers. Then double-layer type EM wave absorbers for improved absorption characteristics are simulated and fabricated in accordance with different layer-sequences.

As a result, in the case of Sendust the absorption ability of EM wave absorber was obtained over 7.9 dB at 2.6 GHz, and in the case of Carbon the absorption ability of EM wave absorber was obtained over 40 dB at 10.2 GHz. In addition, the double-layered EM wave absorber consists of sendust : $\text{Al}(\text{OH})_3$: CPE=85 : 5 : 10wt% and Sendust : $\text{Al}(\text{OH})_3$: CPE=75 : 5 : 20 wt% showed an improvement of the EM wave absorption characteristics of over 10 dB at 2.4 GHz with the thickness of 1.5 mm

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경

현대과학의 눈부신 발전은 전자·통신기기의 고주파화, 소형화, 디지털화, 컴팩트화를 이끌었으며 이로 인해 인류의 일상생활을 편리하게 하는데 많은 기여를 하였다. 반면에 정보통신기기 사용량의 증가와 전자기기의 이용 확대 및 다양화에 의해서 전파환경이 급격하게 악화되고 있으며, 그 결과 고층빌딩 등에 의한 TV 전파의 고스트(Ghost) 현상, 교량 및 철교 등에 의한 선박용 레이더의 허상, 각종 산업현장에서 기계의 오동작을 유발하거나 인체에 해를 미치는 등 여러 가지 전자파장해 (EMI ; Electromagnetic Interference) 현상을 일으키고 있다[2].

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 기지국 등에서 발생하는 전자파에 대한 노출이 건강에 해로운 결과를 초래할 수 있다는 우려를 표명해 왔고, 결과적으로 일부 국가에서는 새로운 전력선과 이동전화망의 구축이 논란의 대상이 되고 있는 실정이다. 특히, 전자파에 대한 인체의 유해성 문제는 유·무해와 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 유·무해성 논란이 지속될 경우 궁극적으로 경제활동에 타격을 줄 수도 있다.

이에 대한 대책으로, 국제적으로는 국제무선장해특별위원회(CISRP ; International Special Committee on Radio Interference), 미국에서는 미연방통신위원회(FCC ; Federal Communications Commissions), 미국국가표준협회(ANSI ; American National Standards Institute) 등에서 규제를 만들어 시행하고 있다.

한편, 전자파내성(EMS ; Electromagnetic Susceptibility)에 대한 규격도 차츰 엄격해져 가고 있으며, 우리나라에서도 2000년부터 EMS 규제를 국내법으로 제정하여 시행하고 있다. 이와 같은 국제적 규제는 단순히 자국내의 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 전자파적합성(EMC ; Electromagnetic Compatibility) 분야에서는 전자파환경의 정량화, 전자계 분포의 측정 등이 필요하다.

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

전파흡수체는 오음손실재료, 유전손실재료, 자성손실재료 등을 이용하여 입사한 전자파를 흡수해서 열로 변환하여 반사파가 생기지 않게 하는 특수재료이다. 전파 흡수체의 역사로 볼 때 1960년대에 개발되어 전파암실이나 안테나의 지향성 개선 등에 널리 사용되어 왔다.

전파흡수체는 전자파 사용초기부터 無反射終端(Nonreflective Termination) 등에 이용되었으며, 그 후 공간을 전파하는 전자파를 흡수 또는 차폐하는 전파흡수체가 개발되어 전파무향실이나 안테나 지향성 개선 등에 널리 사용되고 있다. 이후 마이크로파 중계에 의한 다중통신 기술의 개발, 항공기 및 미사일 등과 같은 이동물체의 전파유도기술의 개발 등과 함께 안테나, 전파전달의 조사·연구를 위해 측정 평가용 전파암실의 구성, TV나 레이더 허상방지용 등 전파흡수체의 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 자성재료 개발이 요구되고 있다.

1.2 연구 목적

현재 전자파 장애 대책을 위한 전파흡수체는 TV 고스트 방지용, 레이더 전파의 흡수를 위한 각종 전자기기로부터의 전파누설 방지용 등으로 널리 사용된다. 하지만 주원료로 이용되는 페라이트(Ferrite) 외의 자성재료를 이용한 전파흡수체에 대한 연구는 그리 많지 않다.

특히 단층 sheet형 전파흡수체의 전파흡수능 향상과 광대역화를 위한 연구가 조성비변화에 따른 흡수특성 변화를 중심으로 이루어지고 있다. 그러나 같은 조성비를 갖는 시편일지라도 제작과정에 따라 물리적, 전자기적 특성이 크게 변할 수 있으므로 제작과정에 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 자성재료를 기초로 하여 이루어지고 있다.

일반적으로는 soft ferrites인 MnZn ferrites와 NiZn ferrites는 전파흡수체의 전파흡수능에 영향을 주는 자기적 손실이 높기 때문에 전파흡수체에서 매우 중요한 재료이다. 그러나 이러한 soft ferrites는 GHz 대역에서 자기적 손실이 급격하게 줄어들기 때문에 GHz 대역의 주파수에서 좋은 전파 흡수체로서 기능을 나타내지 못한다. 그러나 Sr ferrites와 Ba ferrites 같은 Hard ferrites는 GHz 대역의 주파수에서 자기적 손실이 증가되므로 GHz 대역용 전파흡수체로서 매우 유용한 재료라 할 수 있다[9]~[11]. 그러나 아직까지는 이러한 한정된 재료만을 이용하고 있어 다양한 각도에서의 연구개발이 필요하다.

따라서 본 논문에서는 지금까지 전파흡수체에 대표적인 재료로 사용되어 오던 ferrites를 대신하여 자성손실재료인 Sendust와 도전손실재료인 Carbon을 $Al(OH)_3$ 와 혼합한 후 전파흡수체를 제작하여 그 특성을 연구하였으며, Sendust의 경우 구내정보통신망(LAN ; Local Area Network) 주파수인 2.4 GHz 두께 2 mm 이내에서 10 dB 이상, 그리고 Carbon의 경우 두께 2 mm 이내로 X-band 레이더 주파수(9.375 GHz)에서 20 dB 이상의 전파흡수능 구현을 최종 연구목표로 삼았다.

제 2 장 전파흡수체 기초 이론

2.1 전파흡수체 기초 이론

오늘날 우리는 급속도로 발전하고 있는 전기통신 기술에 의해 많은 혜택을 누리고 있으며, 앞으로 그 혜택은 더욱 광범위하고 보편화될 것이다. 그러나 정보화 사회가 촉진되는 과정에서 컴퓨터 등 정보기기가 기하급수적으로 증가함에 따라 전기·전자기기간의 상호 불요전자파에 의한 전자파 장애 등이 심각해져서 전파이용에 대한 범규적인 제약뿐만 아니라 초고주파공업 분야의 연구 및 실험에도 기술적인 제약이 따르게 되었다. 그러므로 이러한 제약을 따르게 하는 불요전자파를 억제하는 일이 매우 중요한 문제로 제시되고 있으며, 이러한 문제점의 해결방법으로는 일반적으로 (1)접지(Grounding), (2)차폐(Shielding), (3)흡수(Absorbing)의 방법이 사용되고 있다. 이러한 방법 중 (2)의 경우는 내부 발전기가 간섭을 일으킬 뿐만 아니라 차단벽 등에 틈이 있는 경우에는 그 효과가 현저히 저하되는 단점을 가지고 있는 반면 최근 가장 주목을 끌고 있는 (3)의 경우는 내부 발전기 등이 안정하고 틈이 있는 경우에도 충분히 가능하다. 따라서 이러한 Absorbing을 이용한 전파흡수체의 연구개발이 활발히 진행되고 있다.

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 전파흡수체를 개발할 필요가 있다. 따라서 금후 30 MHz 이상의 주파수를 만족하는 두께가 얇은 전파흡수체의 연구 개발이 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. 당초에는 적의 레이더에 잠수함이나 비행기가 탐지되지 않도록 하

는 등의 군사 장비면에서의 요구나 전파암실을 구축하기 위해 이용하는 것이 주된 목적이었다. 그러나 근래에 들어서는 전자렌지(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 가리워진 곳에서 실행되는 광학 실험은 그 특성을 조사할 때 외부의 빛의 영향을 받지 않게 하기 위함이고, 가시광선에 대해서 검은 천을 사용하는 것은 빛을 반사하지 않고 잘 흡수하기 때문이다. 이와 같이 광학실험을 행하기 위한 암실과 마찬가지로 전파에 대해서도 어떤 특별한 공간이 필요하다. 전파실험에 있어서 가장 중요시되면서 갖추기가 어려운 것이 전자파의 출입을 제한하는 공간을 구성하는 것이다.

이와 같이 전자파의 출입을 제한하는 공간을 전파암실이라 하고, 이곳에서 광학실험실의 검은색 커튼과 같은 역할을 하는 것이 전파흡수체이다. 만약에 전기에너지를 갖고 있는 건전지에 전구를 연결하면 전구는 빛을 방사하는 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 전파흡수체 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 도전손실계 σ , 자성 손실계 μ'' , 유전손실계 ϵ'' 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) 전파가 1회 밖에 손실재료에 부딪히지 않는 경우 : 그 대표적인 예는 TV 신호의 반사방지에 사용되는 손실재이다.
- 3) 어떤 정해진 통로(전송로)를 통과하는 전자파에 손실을 부여하는 경우 : 그 대표적인 예로는 동축케이블 주위에 붙인 손실재나 전자레인지용 누설방지 손실재가 있다.

이와 같이 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 분류

2.2.1 전파흡수 재료에 의한 분류

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

- 도전성 전파흡수재료
- 유전성 전파흡수재료
- 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 발포폴리스치롤 등이 있다. 이런 종류의 전파흡수체를 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 페라이트판은 비교적 넓은 주파수에 걸쳐 좋은 흡수특성을 나타낸다. 정합하는 주파수는 재질에 의해 결정되고 대강 0.3 ~ 1.5 GHz의 범위에 있다. 전파흡수체의 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 위와 같이 3가지로 분류한 전파흡수재료의 차이를 전기적 재료정수의 관점에서 서술해보자.

우선, 앞에서 서술한 바와 같이 전파손실을 갖는(전파흡수를 일으킴) 재료의 유전율과 투자율은 복소수로 표시되고 그 복소비유전율은 ϵ_r , 복소비투자율은 μ_r 은 각각 다음식으로 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.

$$\varepsilon_r'' = \mu_r'' = 0 \quad (2-3)$$

따라서 ε_r'' 과 μ_r'' 중에 적어도 하나는 0이 아니면 전파흡수를 일으키는 것이 된다.

자성 전파흡수재료란 가해진 자계에 의해 전파흡수가 일어나는 것이다. 따라서 복소투자율의 허수부 μ'' 이 0이 아닌 것이 자성 전파흡수재료이다. 이때 복소 비유전율의 허수부 ε_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 $\mu'' = 0$ 이 되면 무손실 자성체이다. 그리고 도전성 전파흡수재료와 유전성 전파흡수재료는 모두 $\mu_r' = 0$, $\mu'' = 0$ 이다. 여기서, 이 2개의 차이를 설명하면 다음과 같이 된다.

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

$$\varepsilon_r'' = \frac{1}{\omega \varepsilon_0 \rho} = \frac{\chi}{\omega \varepsilon_0} \quad (2-4)$$

여기서, ε_0 는 진공의 유전율로 $\varepsilon_0 = 8.85418782 \times 10^{-12}$ [F/m], ω 는 각주파수 ($\omega = 2\pi f$)이다. 따라서 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 저항을 ρ 는 매우 크지만 높은 주파수로 되면 정전용량에 전류가 흐르기 때문에 저항에도 전류가 흘러 전파손실이 크게 나타난다. 그 때문에 직류의 저항율을 사용해 구한 식 (2-4)에 나타난 관계는 이와 같은 때

질에서는 만족하지 않는다. 이와 같이 식 (2-4)를 만족시키지 않는 재료를 유전성 전파흡수재료라 부른다.

2.2.2 형태에 의한 분류

전파흡수체를 형태에 따라서 분류하면 그림 2.1처럼 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.

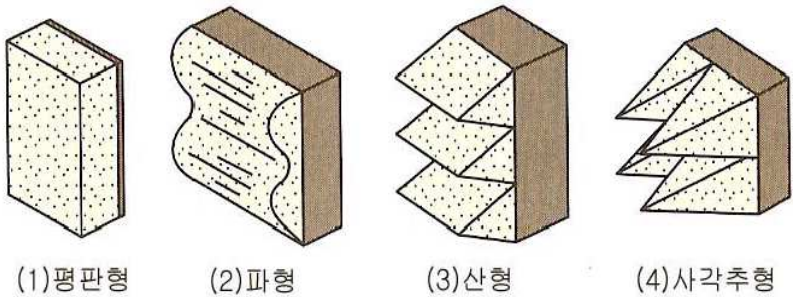


그림 2.1 형태에 의한 분류

Fig. 2.1 Classification by shape

2.2.3 층수에 의한 분류

전파흡수체를 층수로 분류하면 그림 2.2에 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 단층형 전파흡수체나, 유전성 전파

흡수 재료에 의한 단층형 전파흡수체는 일반적으로 주파수 대역폭이 좁은 협대역형 전파흡수 특성을 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 고스트방지 처럼 2개의 주파수대역에서 흡수가 요구되거나, 구내 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.

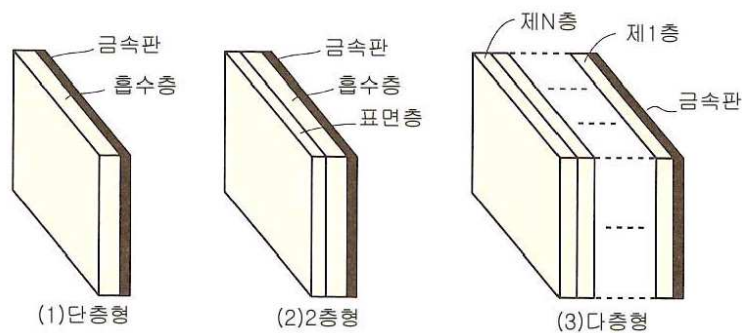


그림 2.2 층수에 의한 분류

Fig 2.2 Classification by layer

일반적으로 전파흡수체는 다층형으로 구성함으로써 주파수 대역폭이 넓어진

다. 따라서, 광대역 특성이나 초광각도 특성이 요구되는 전파무향실용으로는 다층형 전파흡수체를 이용한다.

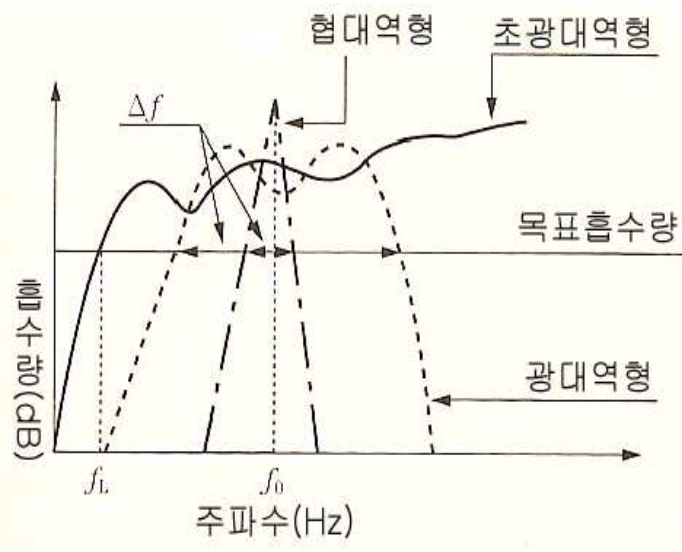


그림 2.3 주파수특성에 의한 분류

Fig 2.3 Classification by frequency characteristic

2.3 전파흡수체의 종류

(1) 전파 장애방지 대책용 전파흡수체

고층 건축물에 의한 텔레비전 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 붙은 방으로 내부에서 발생된 전파는 벽면에서 흡수되어 반사파가 생기지 않으므로 전파적으로 보면 무한공간과 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 밀리미터파대까지 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 밀리미터파대에 대한 전파흡수체의 필요성도 높아져가고 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 정보 전달의 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 중요해지고 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 되돌아온다. 이러한 현상은 전파흡수체에 의해 반사파를 없앤 것이 아니고 전파흡수체에서 전파가 되돌아 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 사용

목적에 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 Δf 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 협대역형으로 0.64 mm로 약 10 GHz에 대해서 반사계수 -20 dB인 것으로 실리콘 내에 자성체를 혼입한 유연한 sheet이다.

(3) 편파특성이 뛰어날 것

전파흡수체에 전파가 사입사 하는 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 고층건물의 벽면이나

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

(5) 강도가 있을 것

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

(6) 내후성(耐朽性)이 뛰어날 것

전파흡수체는 실내 또는 실외에서도 많이 사용되기 때문에 장기간의 내 환경 특성이 뛰어난 전파흡수체가 요구된다.

2.5 전파흡수체 분포정수회로화

2.5.1 파동방정식(Helmholtz Equation)

(1) 단순매질영역의 파동방정식

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

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.5)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2.6)$$

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

전원분포가 없는 무손실 단순매질 이라면 $\sigma = 0$ 이므로 식 (2.5) 양변에 회전을

취하여 식 (2.6)을 대입하여 정리하면

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (2.7)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (2.8)$$

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

$$\nabla^2 \mathbf{E} + \omega^2 \mu \varepsilon \mathbf{E} = \nabla^2 \mathbf{E} + \gamma^2 \mathbf{E} = 0 \quad (2.9)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} + \omega^2 \mu \varepsilon \mathbf{H} = \nabla^2 \mathbf{H} + \gamma^2 \mathbf{H} = 0 \quad (2.10)$$

로 된다. 식 (2.9)와 식 (2.10)은 동일한 형태의 방정식이므로 전계와 자계는 같은 형식의 해를 갖게 된다. 또한 식 (2.5)~식 (2.10)에서 회전으로 인한 성분은 다음과 같고 z 방향 성분은 존재하지 않는다.

$$\frac{\partial E_y}{\partial z} = j\omega \mu H_x \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial H_x}{\partial z} = j\omega \varepsilon E_y \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial z} = -j\omega \mu H_y \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial z} = -j\omega\epsilon E_x \quad (2.14)$$

식 (2.11)~식 (2.14)을 고려하면 식 (2.9)와 식 (2.10)은 다음과 같은 평면파의 파동방정식으로 되어

$$\nabla^2 E_x + \gamma^2 E_x = 0 \quad (2.15)$$

$$\nabla^2 H_y + \gamma^2 H_y = 0 \quad (2.16)$$

장(field)을 만드는 전원(source) \mathbf{J} , ρ 의 분포가 없을 때 평면파에서 전자파가 진행해 나갈 때의 파동을 나타낸다. 식 (2.15)와 식 (2.16)의 해를 지수함수 형태로 나타내면 다음과 같이 된다.

$$E_x = E^+ e^{-\gamma z} + E^- + e^{\gamma z} \quad (2.17)$$

$$H_y = \frac{1}{Z_c} (E^+ e^{-\gamma z} - E^- + e^{\gamma z}) \quad (2.18)$$

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 실제로 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 전류 원으로 부터 멀리 떨어진 곳에서의 구면파를 부분적으로 조사 할 때는 수식적으로 간단하기 때문에 평면파로 취급할 수 있게 된다[3],[4],[7].

(2) 분포정수회로의 파동방정식

다음으로 일반적인 전송선로의 분포정수회로에 대하여 생각해본다.

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 R 은 단위길이 당 저항성분(Ω/m)으로 도체의 불완전한 상태를 표시하며, L 은 단위길이 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.

마디 A B에서 KVL을 적용하고, 마디 B C에서 KCL을 적용하면

$$\frac{\partial v(t,z)}{\partial z} = - \left[Ri(t,z) + L \frac{\partial i(t,z)}{\partial t} \right] \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial i(t,z)}{\partial z} = - \left[Gv(t,z) + C \frac{\partial v(t,z)}{\partial t} \right] \quad (2.20)$$

여기서 z 는 선로를 진행하는 거리함수이다.

$R=0, G=0$ 인 무손실 전송선로(lossless line)에서 식 (2.19)와 식 (2.20)의 폐이저 표현은

$$\frac{dV(z)}{dz} = - (R + j\omega L)I = - Z_s I(z) \quad (2.21)$$

$$\frac{dI(z)}{dz} = -(G + j\omega C)V = -Y_p V(z) \quad (2.22)$$

여기서 $\gamma^2 = Z_s Y_p$ 의 복소전파정수(complex propagation constant)를 도입하면 식(2.21)과 식 (2.22)는

$$\frac{d^2 V(z)}{dz^2} = \gamma^2 V(z) \quad (2.23)$$

$$\frac{d^2 I(z)}{dz^2} = \gamma^2 I(z) \quad (2.24)$$

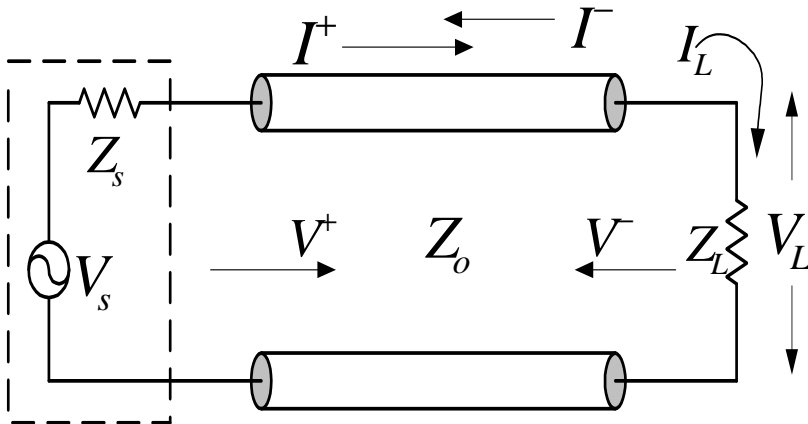


그림 2.4 일반적인 전송선로

Fig. 2.4 General Transmission Line.

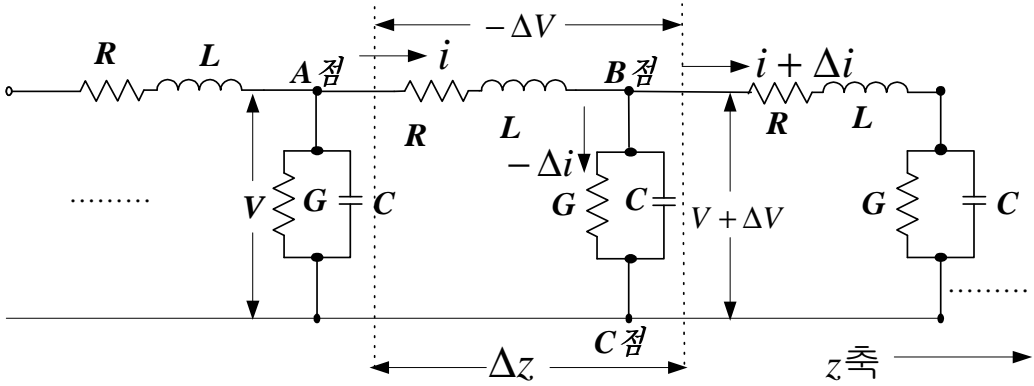


그림 2.5 일반적인 전송선로의 등가회로

Fig. 2.5 Equivalent Circuit of General Transmission Line

가 된다. 식 (2.23)과 식 (2.24)에서 일반적인 2계 미분방정식의 해는 독립된 두 개의 항을 가지므로 부하임피던스 Z_L 을 전파함수체의 특성임피던스 Z_C 로 하면

$$V(z) = V_i e^{-\gamma z} + V_r e^{+\gamma z} = V^+ + V^- \quad (2.25)$$

$$I(z) = \frac{1}{Z_C} (V_i e^{-\gamma z} - V_r e^{+\gamma z}) = \frac{1}{Z_C} (V^+ - V^-) \quad (2.26)$$

로 되어 평면파에서 식 (2.25)와 식 (2.26)과 같은 형태가 된다.

2.5.2 분포정수회로화

먼저 식 (2.13)과 식 (2.14) 및 식 (2.21)과 식 (2.22)에서

$$\mu = \mu' - j\mu'' \quad (2.27)$$

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (2.28)$$

로 놓고 $R=0, G=0$ 인 무손실 전송선로(lossless transmission line)에서 분포 정수회로의 기본식을 표현하면

$$\frac{dE_x}{dz} = -j\omega(\mu' - j\mu'')H_y = (-\omega\mu'' - j\omega\mu')H_y = -(\omega\mu'' + j\omega\mu')H_y \quad (2.29)$$

$$\frac{dH_y}{dz} = -j\omega(\epsilon' - j\epsilon'')E_x = (-j\omega\epsilon' - \omega\epsilon'')E_x = -(\omega\epsilon'' + j\omega\epsilon')E_x \quad (2.30)$$

$$\frac{dV(z)}{dz} = -(R + j\omega L)I = -Z_s I(z) \quad (2.31)$$

$$\frac{dI(z)}{dz} = -(G + j\omega C)V = -Y_p V(z) \quad (2.32)$$

이 되어 식 (2.29)~식 (2.32)를 비교하면 같은 형태의 식으로 대응한다. 따라서 다음 파라미터를 치환하여도 양자는 일치됨을 알 수 있다. 즉, 분포정수 회로에서의 V, I 는 개념적으로 E_x, H_x 에 대응하며 마찬가지로 분포정수회로의 L, C, R, G 는 전자장에서 $\mu', \epsilon', \omega\mu'', \omega\epsilon''$ 에 대응하게 된다.

이것을 정리하면

$$L \leftrightarrow \mu', \quad C \leftrightarrow \epsilon', \quad R \leftrightarrow \omega\mu'', \quad G \leftrightarrow \omega\epsilon'' \quad (2.33)$$

으로 되고, 이러한 대응관계를 분포정수회로의 전파정수에 적용하면

$$\begin{aligned} \gamma &= \sqrt{ZY} = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \\ &= \sqrt{(\omega\mu'' + j\omega\mu')(\omega\epsilon'' + j\omega\epsilon')} = j\omega\sqrt{\epsilon\mu} \end{aligned} \quad (2.34)$$

이 되며, 또한 선로 특성임피던스는

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

$$Z_C = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} = \sqrt{\frac{\mu_o\mu_r}{\varepsilon_o\varepsilon_r}} \quad (2.35)$$

가 되어 분포정수회로에서의 특성임피던스 Z_C 는 Electromagnetic Fields 에서의 파동임피던스와 쌍대 관계에 있음을 알 수 있다. 또한 공기 중에서의 ε' , μ' 의 값은 1이고 ε'' , μ'' 의 값은 0이므로

$$\varepsilon = \varepsilon_o \varepsilon_r = \varepsilon_o (\varepsilon' - j\varepsilon'') = \varepsilon_o \quad (2.36)$$

$$\mu = \mu_o \mu_r = \mu_o (\mu' - j\mu'') = \mu_o \quad (2.37)$$

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

$$Z_O = \sqrt{\frac{\mu_o}{\varepsilon_o}} = 120\pi \cong 377\Omega \quad (2.38)$$

식 (2.35)를 식 (2.38)로 정규화(normalized)시키면

$$z_c = \sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}} \quad (2.39)$$

로 소문자로 나타내기로 한다. 또한 진공중과 임의의 매질에서 전파정수는

$$\gamma_o = j\beta_o = j\omega\sqrt{\varepsilon_o\mu_o} \quad (2.40)$$

$$\begin{aligned}
\gamma &= \sqrt{ZY} = \sqrt{(R+j\omega L)(G+j\omega C)} = \sqrt{\omega\mu'' + j\omega\mu'}(\omega\epsilon'' + j\omega\epsilon') \\
&= \sqrt{j\omega(\mu' - j\mu'')j\omega(\epsilon' - j\epsilon'')} = j\omega\sqrt{(\mu' - j\mu'')(\epsilon' - j\epsilon'')} \\
&= j\omega\sqrt{\epsilon\mu} = j2\pi f\sqrt{\epsilon\mu} = j2\pi\frac{\sqrt{\epsilon\mu}}{\lambda\sqrt{\epsilon_0\mu_0}} = j\frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{\epsilon_r\mu_r}
\end{aligned} \tag{2.41}$$

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 컨덕턴스 G 이다. 유전율 $\epsilon (= \epsilon' - j\epsilon'')$ 과 투자율 $\mu (= \mu' - j\mu'')$ 에 주목하여 보면 R 과 G 에 대응하는 것은 각각의 복소성분 μ'' 과 ϵ'' 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 도체금속판의 앞에 적당한 얇은 재료를 한 장 또는 여러 장을 배치하여 실현시킨다. 전자파의 입사 방향에서 보면 공기층과 전파흡수체 층으로 놓여 진 것으로 된다. 여기에 사용된 재료정수는 투자율 μ 와 유전율 ϵ 을 가지고 있다. 이 들 재료정수를 식 (2.33)에 적용하면 분포정수회로화 할 수 있다.

식 (2.25)와 식 (2.26)에서 $V_i e^{-\gamma z}$, $V_r e^{\gamma z}$ 는 각각 전원에서 부하방향 및 부하에서 전원방향으로 진행하는 파로서 부하측 에서 보면, 전자는 입사파, 후자는 반사파가 된다.

반사파는 전자파가 진행하는 매질의 임피던스와 부하임피던스의 부정합에 의한 것으로 이 부분을 정합시킴으로서 반사파 성분을 제거 할 수 있고 전파흡수체 경우 전자파가 진행하는 매질의 임피던스와 흡수체의 임피던스를 정합 시킨 것이라 할 수 있다.

식 (2.25)와 식 (2.26)을 쌍곡선함수로 표현하여 분포정수회로 임의의 점 d 에서 임피던스는

$$Z(d) = \frac{V(d)}{I(d)} = Z_c \frac{Z_L + Z_c t \operatorname{anh} \gamma d}{Z_c + Z_L t \operatorname{anh} \gamma d} \tag{2.42}$$

가 된다.

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

$$Z_{in} = Z_C \tanh \gamma d \quad (2.43)$$

가 된다. 여기서 d 는 전파흡수체의 두께에 해당되며 Z_C 는 전파흡수체 특성임피던스이다. 따라서 식 (2.41)에 식 (2.34), (2.35)를 적용하면 수전단에서 두께 d 만큼 떨어진 전파흡수체 표면에서의 임피던스는

$$Z_{in} = Z_C \tanh \gamma d = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \tanh(j\omega \sqrt{\epsilon\mu}) d \quad (2.44)$$

이고 식 (2.44)를 정규화(normalized)시키면

$$\hat{z}_{in} = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tanh(j\omega \sqrt{\epsilon_r \mu_r}) d \quad (2.45)$$

이 된다.

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

식 (2.25)~(2.26)으로 부터 전압과 전류 반사계수(reflection coefficient)는

$$\Gamma_V(z) = \frac{V^- e^{-\gamma z}}{V^+ e^{\gamma z}} = \frac{V^-}{V^+} e^{-2\gamma z} \quad (2.46)$$

$$\Gamma_I(z) = \frac{-V^- e^{-\gamma z}/Z_o}{V^+ e^{\gamma z}/Z_o} = -\frac{V^-}{V^+} e^{-2\gamma z} = -\Gamma_V(z) \quad (2.47)$$

로 정의되고 $z=0$ 에서는

$$\Gamma_V(0) = \frac{V^-}{V^+} = \frac{\hat{z}_L - 1}{\hat{z}_L + 1} \quad (2.48)$$

따라서 임의의 점 x 에서 부하를 바라본 임피던스는

$$Z_{in} = \frac{V(x)}{I(x)} = Z_o \frac{1 + \Gamma(x)}{1 - \Gamma(x)} \quad (2.49)$$

이고 식 (2.49)를 정규화 시키면

$$\hat{z}_{in} = \frac{Z_{in}(x)}{Z_o} = \frac{1 + \Gamma(x)}{1 - \Gamma(x)} \quad (2.50)$$

이다. 또한 식 (2.50)의 반사계수를 정규화 임피던스로 나타내면

$$\Gamma(x) = \frac{\hat{z}_{in} - 1}{\hat{z}_{in} + 1} \quad (2.51)$$

이 된다. 반사계수 Γ 는 0~1까지의 값을 갖는데 전파흡수체에서는 Γ 가 적을수록 전파의 흡수능이 뛰어나고 볼 수 있다. 가령 Γ 가 0이면 무반사 이므로 전자파 에너지의 완전 흡수가 일어나고 Γ 가 1이면 완전반사로 전파흡수는 일어나지 않는다[1],[7],[8].

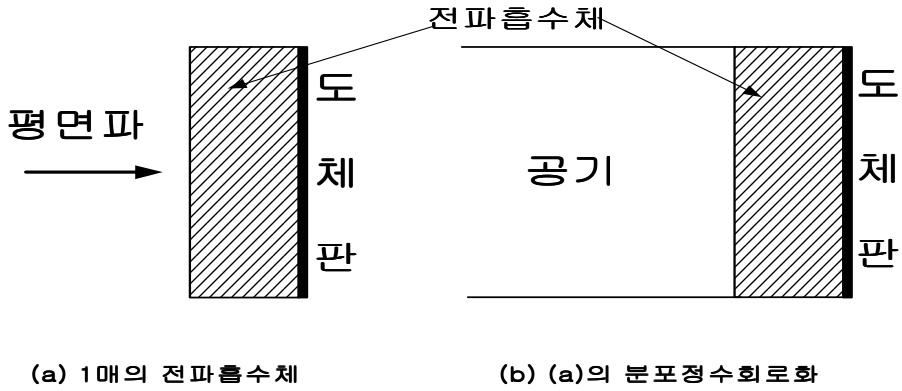


그림 2.6 전파흡수의 기본 구성
 Fig. 2.6 Basic Composition of Electr

2.6 단층형 전파흡수체 및 다층형 전파흡수체

2.6.1 단층형 전파흡수체

두께 d 의 전파흡수체를 판상으로 하여 금속판 위에 놓은 경우, 평면파의 수직입사에 대한 파동임피던스 \hat{z} 는 진공중의 평면파 파동임피던스로 정규화 하여 식 (2.52)과같이 주어진다.

$$\hat{z} = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tanh\left(j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon_r \mu_r} d\right) \quad (2.52)$$

여기서 λ 는 입사한 평면파의 진공중의 파장이며, ϵ_r 은 비유전율(ϵ/ϵ_0), μ_r 은 비투자율(μ/μ_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 (2.53)과 같다.

$$\sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}} \tanh\left(j\frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\varepsilon_r \mu_r} d\right) = 1 \quad (2.53)$$

(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 (2.53)의 비투자율 μ_r 을 1로 두면 식 (2.54)과 같이 된다.

$$1 = \sqrt{\frac{1}{\varepsilon_r}} \tanh\left(j\frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\varepsilon_r} d\right) \quad (2.54)$$

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

(2) 자성 재료의 경우

$$\sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}} \tanh\left(j\frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\varepsilon_r \mu_r} d\right) = 1 \quad (2.55)$$

비자성 재료에서는 $\mu_r = 1$ 로 했지만, 자성 재료의 경우는 μ_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/λ 의 5개 변수가 있다.

식 (2.55)을 고쳐 쓰면

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

$$\omega = j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\varepsilon_r \mu_r} d \quad (2.56)$$

식 (2.56)의 관계를 만족하는 재료(μ_r , ε_r , d)가 있으면 전파흡수체는 가능하나 목표는 $d \ll \lambda$ 의 조건하에서 식 (2.56)를 만족시켜야 하는 것이다. $d \ll \lambda$ 의 경우 식 (2.56)에서 ω 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 (2.55)를 다음과 같이 변형할 수 있다.

$$1 = \sqrt{\frac{1}{\varepsilon_r}} \left(j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\varepsilon_r \mu_r} d \right) = j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\mu_r} d \quad (2.57)$$

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

$$1 = \frac{2\pi}{\lambda} \mu_r'' d + j \frac{2\pi}{\lambda} \mu_r' d \quad (2.58)$$

이고 식 (2.58)로부터 $\mu_r' = 0$, $\mu_r' \gg 1$ 인 재료에서 파장 λ 의 전파를 흡수하기 위해 필요한 두께 d 는

$$d = \frac{\lambda}{2\pi\mu_r} \quad (2.59)$$

가 된다.

페라이트재의 μ_r 의 주파수 특성은 공명주파수 f_r 보다 높은 주파수대에서는 상기 정합 조건을 근사적으로 만족할 수 있다. 이 경우 두께 d 에 재료의 유전

을 ϵ_r 이 관계하지 않는 것은 $d \ll \lambda$ 이며, 재료는 금속판에 부착되어 있으므로 재료의 내부에서 자계는 크지만 전계는 매우 약하기 때문이다. 따라서 전계에 동작하는 ϵ_r 효과는 나타나지 않는 것이다[6].

(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 μ_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 (2.55)는 다음과 같다.

$$1 = \frac{\sqrt{\mu_r'' - j\mu_r''}}{\epsilon_r} \tanh\left(j \frac{2\pi}{C} \sqrt{\epsilon_r'(\mu_r' - j\mu_r'')} f d\right) \quad (2.60)$$

이 식은 ϵ_r'' 및 f_d 를 매개 변수로 하여 주어진 ϵ_r'' 에 대한 f_d 를 지정하고 그때에 필요로 하는 μ_r 을 구한다.

이러한 조작으로 주어진 재료가 어떤 주파수에서 어느 두께일 때 전파흡수체로 되는가가 구해진다. 페라이트의 μ_r 은 공명주파수 f_r 보다 높은 주파수 범위에서는 변화의 양이 크므로, 주파수에 의한 ϵ_r'' 의 변화가 거의 없는 통상의 유전체와 같이 d/λ 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 λ 의 비만이 결정되는 것이다. 따라서 각종 파장의 전파에 대해서 재료의 두께 d 를 변환시키면 무반사 조건을 만족시킬 수 있다. 하지만 페라이트와 같이 μ_r 이 주파수에 따라 크게 변화하는 경우에는 정합주파수가 모두 각각 유일하게 정해진다.

2.6.2 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 2.7은 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.

$$\frac{dZ_x}{dx} = j \frac{2\pi}{\lambda} (1 - \epsilon_{r_x} Z_x^2) \quad (2.61)$$

여기서, λ : 입사파의 파장

ϵ_{r_x} : x 에 있어서의 매질의 복소유전율

이라 하고 투자율에 대해서는 자유공간중의 μ_0 가 매체 중에서도 변화하지 않는 것으로 한다. 또 전파흡수체 표면에서의 규격화 입력임피던스를 Z 라 하면, 이 점에 있어서의 반사계수 S 는 식 (2.62)와 같다.

$$S = \frac{\hat{z} - 1}{\hat{z} + 1} \quad (2.62)$$

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 (2.63)과 같은 식이 된다.

$$\frac{\hat{z}-1}{\hat{z}+1} \leq |S_0| \quad (2.63)$$

따라서 식 (2.63)을 조건으로 하여 식 (2.61)를 풀어서 Z_x 를 구하면 된다. 그러나 식 (2.61)은 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 (2.64)와 같이 된다.

$$\epsilon_{r,x} = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' = 1 - j \left[\frac{3.9(1-x)}{1} - 0.9 \right] \quad (2.64)$$

그러나, 실제 이와 같은 $\epsilon_{r,x}$ 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 2.7의 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 실용적이지 못하다. 즉, 이러한 전파흡수체는 허용 정재파비를 1.1로 할 때 사용최저주파수의 파장 λ 에 대해서, 전파흡수체의 두께는 $0.6\lambda_g$ 로 되므로 100 MHz 정도의 주파수대에서 사용할 전파흡수체의 두께는 1.8 m나 된다.

그러나 자성재료인 페라이트를 이용하면 30 ~ 1,000 MHz 정도의 비교적 낮

은 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.

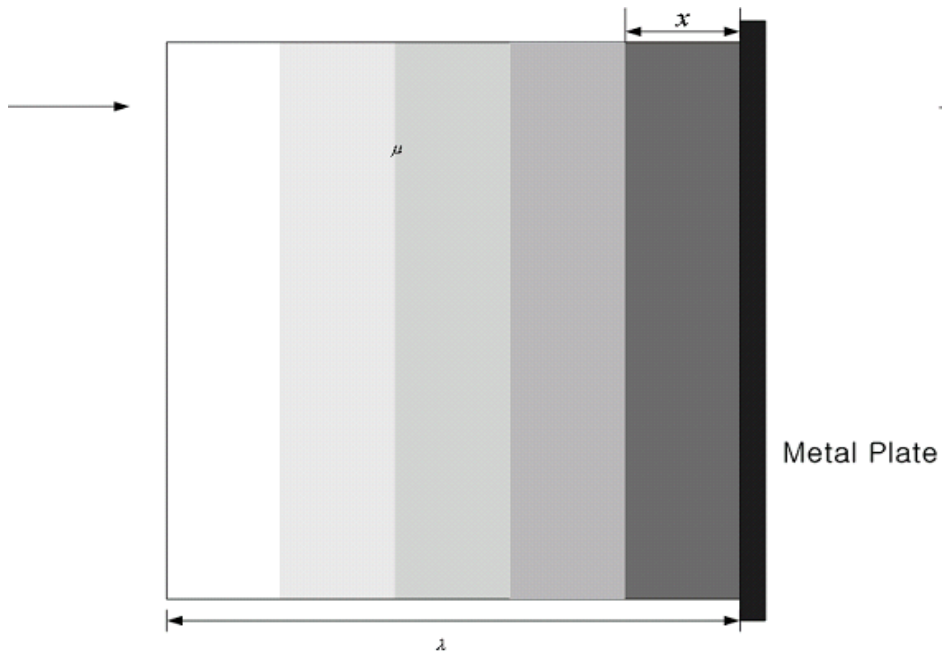


그림 2.7 광대역 전파흡수체

Fig. 2.7 Wide-band electromagnetic wave absorber

(1) 다층형 전파흡수체의 기본식

그림 2.8과 같이 전파흡수체의 뒤에 금속판을 부착하고, 그 전면에 n 개 층의 전파흡수체를 적층한 경우, 제 n 층의 두께를 d_n , 비투자율을 μ_{rn} , 비유전율을 ϵ_{rn} 으로 했을 때 평면파가 흡수체 전면에서 수직으로 입사하면, n 층의 전면에서 우측을 보는 정규화 입력임피던스 z_n 은 식 (2.65)와 같이 된다.

$$z_n = z_{cn} \frac{z_{n-1} + z_{cn} \tanh(\gamma_n d_n)}{z_{cn} + z_{n-1} + \tanh(\gamma_n d_n)} \quad (2.65)$$

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

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

$$z_{cn} = \sqrt{\mu_{rn} / \varepsilon_{rn}} \quad (2.66)$$

$$\gamma_n = j\omega \sqrt{\mu_{rn} \varepsilon_{rn}} \quad (2.67)$$

따라서 첫 번째 층에서의 정규화 입력임피던스는 다음 식 (2.68)과 같다.

$$z_1 = \sqrt{\frac{\mu_{r1}}{\varepsilon_{r1}}} \tanh(j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\varepsilon_{r1} \mu_{r1}} d_1) \quad (2.68)$$

i 번째 층에서의 정규화 입력임피던스는 다음 식 (2.69)와 같다.

$$z_i = \sqrt{\frac{\mu_{ri}}{\varepsilon_{ri}}} \frac{z_{i-1} + \sqrt{\frac{\mu_{ri}}{\varepsilon_{ri}}} \tanh(j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\mu_{ri} \varepsilon_{ri}} d_i)}{\sqrt{\frac{\mu_{ri}}{\varepsilon_{ri}}} + z_{i-1} \tanh(j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\mu_{ri} \varepsilon_{ri}} d_i)} \quad (2.69)$$

n 번째 층에서의 정규화 입력임피던스는 다음 식 (2.70)과 같다.

$$z_n = \sqrt{\frac{\mu_{rn}}{\varepsilon_{rn}}} \frac{z_{n-1} + \sqrt{\frac{\mu_{rn}}{\varepsilon_{rn}}} \tanh(j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\mu_{rn} \varepsilon_{rn}} d_n)}{\sqrt{\frac{\mu_{rn}}{\varepsilon_{rn}}} + z_{n-1} \tanh(j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\mu_{rn} \varepsilon_{rn}} d_n)} \quad (2.70)$$

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

전파흡수체 전면에서의 반사계수는

$$S_n = \frac{z_n - 1}{z_n + 1} \tag{2.71}$$

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 (2.71)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[1].

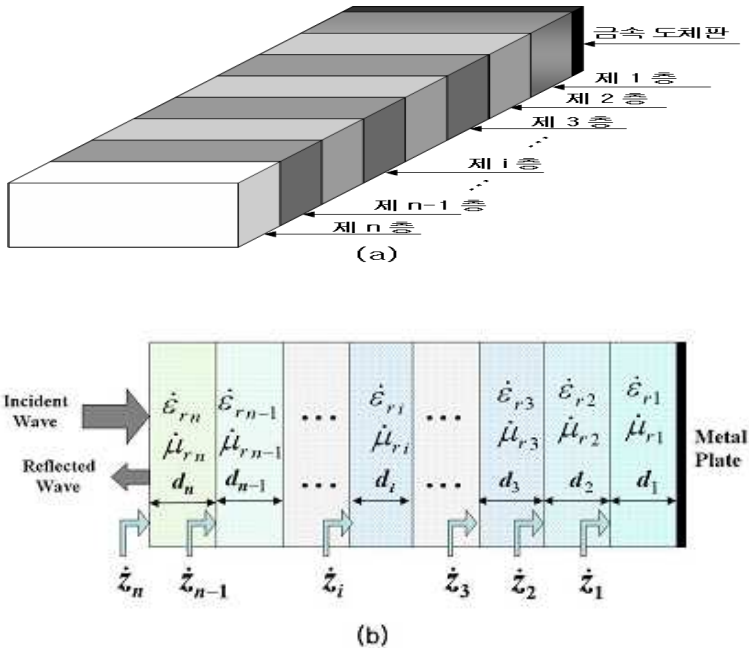


그림 2.8 다층형 전파흡수체 모델
 Fig. 2.8 Multi-layered model for EM wave absorber

2.7 전파흡수체의 반사계수 측정 및 재료정수 측정법

2.7.1 전파흡수체의 반사계수 측정

본 논문에서 제작된 Sheet형 전파흡수체 반사계수를 측정하는데 사용되는 장비는 다음과 같다. 반사계수 측정법에 사용되는 장비는 그림 2.9의 Network Analyzer와 그림 2.10의 Sample Holder가 사용된다.



그림 2.9 Model 360B 네트워크 아날라이저
Fig. 2.9 Model 360B Network Analyzer.



그림 2.10 Wiltron사의 Sample Holder
Fig. 2.10 Sample Holder of Wiltron.

2.7.2 전파흡수체의 재료정수 측정법

(1) 사용된 Sample Holder

그림 2.11은 One-Port Method $\ell-2\ell$ 법을 사용하여 전파흡수체의 전파흡수능과 재료정수를 측정할 시료의 2 mm, 4 mm Sample 도면이다.

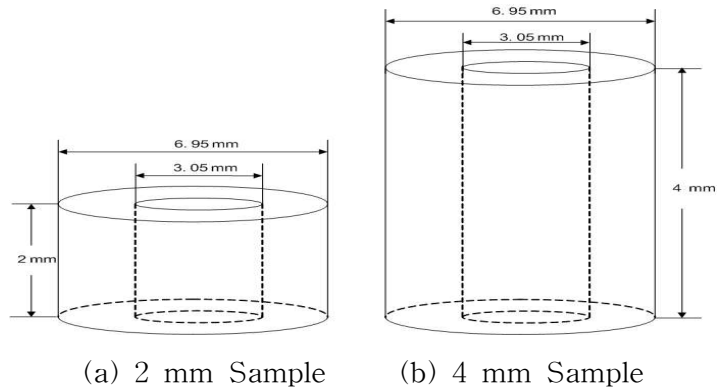
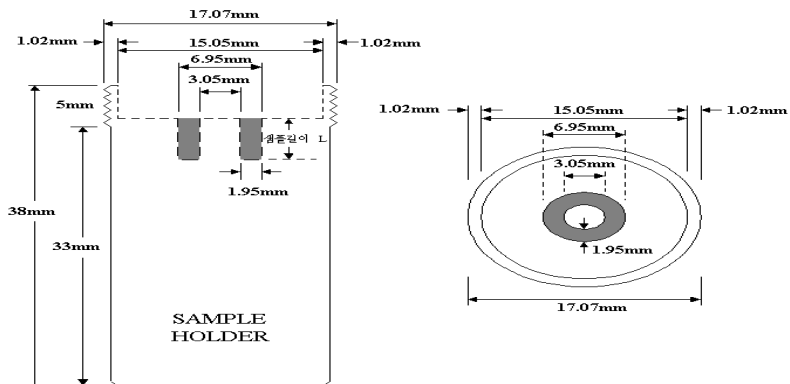


그림 2.11 제작된 Sample 도면 (a) 2 mm (b) 4 mm

Fig. 2.11 Manufactured sample (a) 2 mm and (b) 4 mm



(a) Sample Holder의 단면 (b) Sample Holder의 평면

그림 2.12 Sample Holder 단면도와 평면도

Fig. 2.12 Sample Holder (a) Section, (b) Plane.

그림 2.12는 시료를 측정할 수 있도록 만들어진 Sample Holder의 단면(a)와 위에서 본 평면(b)의 그림이다. 진하게 칠해져 있는 부분에 Sample이 삽입되는 곳이며 이 Holder는 Network Analyzer(HP:8753D)와의 연결 시 틈이 없는 Sample Holder이다.

(2) 재료정수 계산방법

본 논문에서는 전파흡수체 시편의 재료정수를 계산하기 위한 반사손실은 Wiltron(Model 360B Network Analyzer)을 사용하여 측정하였고, 측정된 반사손실을 이용하여 다음과 같은 방법으로 계산하였다.

우선, Sample Holder를 사용하고 그림 2.13에서 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 ℓ 일 때와 2ℓ 일 때의 임피던스만 계산하면 된다. 우선 그림 2.13과 같이 Sample 길이가 ℓ 일 때의 임피던스는

$$Z(\ell) = \frac{1 + S_{11}(\ell)}{1 - S_{11}(\ell)} \quad (2.72)$$

와 같이 구해진다.

그림 2.14와 같이 Sample 길이가 2ℓ 일 때의 반사계수 $S_{11}(2\ell)$ 은 전체의 반사계수 $S_{11}(\ell)$ 과 같게 된다. 그러므로 2ℓ 일 때의 임피던스 식 (2.73)과 같다.

$$Z(2\ell) = \frac{1 + S_{11}(2\ell)}{1 - S_{11}(2\ell)} \quad (2.73)$$

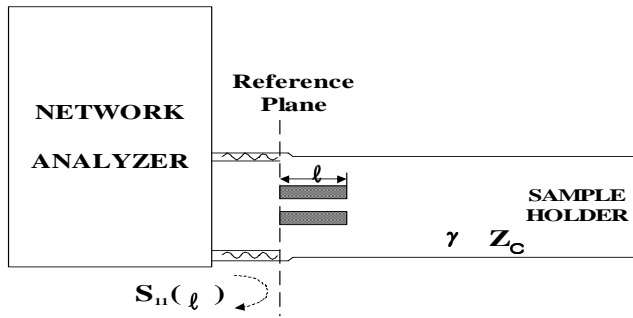


그림 2.13 샘플의 길이가 l 인 Sample Holder
 Fig. 2.13 Sample Holder with sample length l

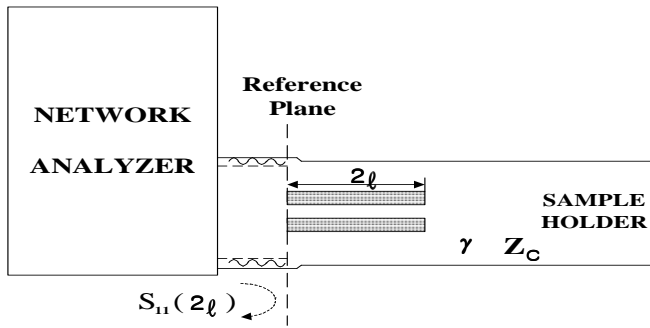


그림 2.14 샘플의 길이가 $2l$ 인 Sample Holder
 Fig. 2.14 Sample Holder with sample length $2l$

한편 Network Analyzer의 Port와 Sample Holder는 틈이 없이 밀착되므로 식 (2.74)와 식 (2.75)는

$$Z(l) = Z_c \tanh(\gamma l) \quad (2.74)$$

$$Z(2l) = Z_c \tanh(2\gamma l) \quad (2.75)$$

와 같이 쓸 수 있다. 식 (2.74)과 식 (2.75)에 하이퍼볼릭 탄젠트 공식을 적용하면,

$$\tanh(2\gamma\ell) = \frac{2\tanh(\gamma\ell)}{1+\tanh^2(\gamma\ell)} \quad (2.76)$$

이 되고, 식 (2.76)을 변형하면

$$Z(2\ell) = \frac{2\tanh(\gamma\ell)}{1+\tanh^2(\gamma\ell)} \quad (2.77)$$

$$\tanh(r\ell) = \sqrt{\frac{2Z\ell - Z(2\ell)}{Z(2\ell)}} \quad (2.78)$$

이 된다. 식 (2.78)로부터 γ , Z_c 을 도출하면

$$\gamma = \frac{1}{\ell} \tanh^{-1} \sqrt{\frac{2Z(\ell) - Z(2\ell)}{Z(2\ell)}} \quad (2.79)$$

$$Z_c = Z(\ell) \sqrt{\frac{Z(2\ell)}{2Z(\ell) - Z(2\ell)}} \quad (2.80)$$

이 된다. 식 (2.79)와 식 (2.80)을 대입해서 풀면

$$\varepsilon_\gamma = -j \frac{C}{2\pi f} \cdot \frac{\frac{1}{\ell} \tanh^{-1} \sqrt{\frac{2Z(\ell) - Z(2\ell)}{Z(2\ell)}}}{Z(\ell) \sqrt{\frac{2Z(\ell)}{2Z(\ell) - Z(2\ell)}}} \quad (2.81)$$

$$\mu_\gamma = -j \frac{C}{2\pi f} \cdot \frac{1}{\ell} \tanh^{-1} \sqrt{\frac{2Z(\ell) - Z(2\ell)}{Z(2\ell)}} \cdot Z(\ell) \sqrt{\frac{2Z(\ell) - Z(2\ell)}{Z(2\ell)}} \quad (2.82)$$

이 구하여진다[1],[6].

제 3 장 전파흡수체의 설계·제작 및 전파흡수성능 평가

3.1 전파흡수체의 설계 및 제작

본 논문에서는 전파흡수체를 설계하기 위하여 자성손실 재료인 Sendust의 경우 혼합비가 Sendust : $\text{Al}(\text{OH})_3$: CPE=75 : 5 : 20 wt%, 80 : 5 : 15 wt%, 85 : 5 : 10 wt% 도전손실 재료인 Carbon의 경우 혼합비가 Carbon : $\text{Al}(\text{OH})_3$: CPE=40 : 3 : 57 wt%, 45 : 3 : 52 wt%, 50 : 3 : 47 wt%로 샘플들을 제작한 후 Network Analyzer를 이용하여 이 샘플들을 측정하였다. 그리고 전파흡수체의 설계를 위해 혼합비 별로 샘플의 두께를 1 mm와 2 mm로 해서 길이변화에 의한 측정법으로 측정하여 MatLab으로 재료정수를 계산하여 그림 3.1 ~ 그림 3.6에 나타내었다. 이 재료정수를 이용하여 전파흡수체를 설계한 후 Open Roller를 이용하여 70°C에서 30분간 제작한 다음 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 가 Sendust와 Carbon의 전파흡수 특성에 어떠한 영향을 미치는지를 연구하였다.

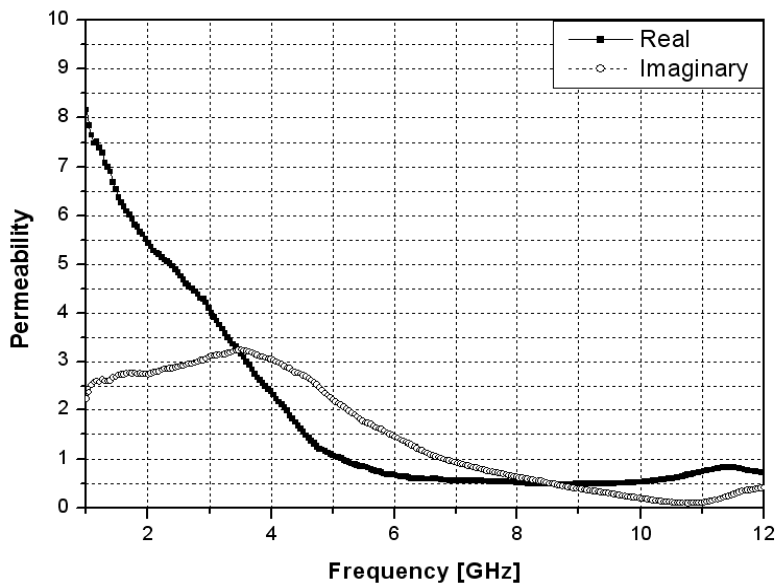


그림 3.1 복소비투자율 (Sendust : $\text{Al}(\text{OH})_3$: CPE=75 : 5 : 20 wt%)

Fig. 3.1 Complex permeability (Sendust : $\text{Al}(\text{OH})_3$: CPE=75 : 5 : 20 wt%)

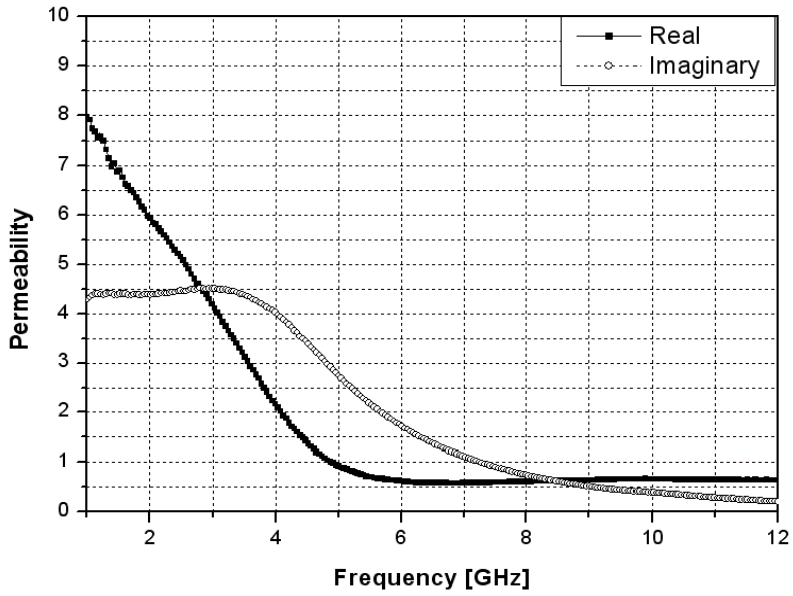


그림 3.2 복소비투자율 (Sendust : Al(OH)₃ : CPE=80 : 5 : 15 wt%)

Fig. 3.2 Complex permeability (Sendust : Al(OH)₃ : CPE=80 : 5 : 15 wt%)

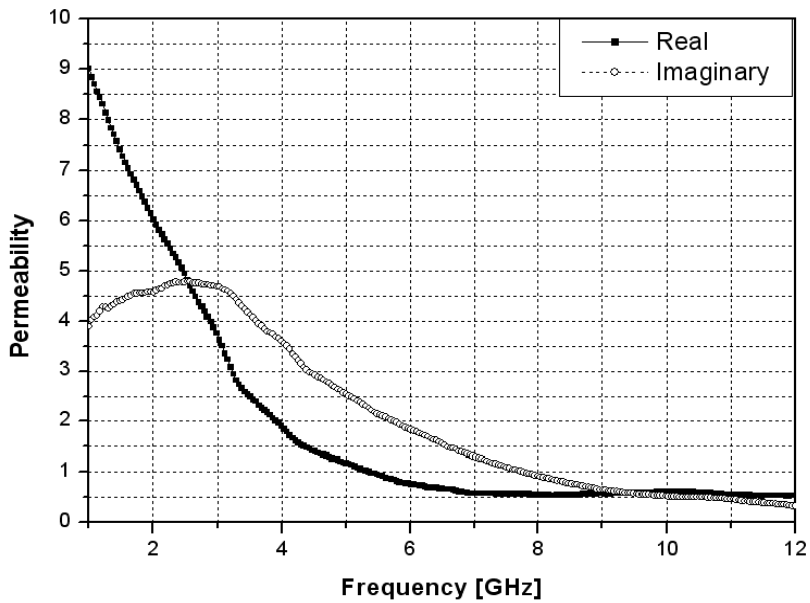


그림 3.3 복소비투자율 (Sendust : Al(OH)₃ : CPE=85 : 5 : 10 wt%)

Fig. 3.3 Complex permeability (Sendust : Al(OH)₃ : CPE=85 : 5 : 10 wt%)

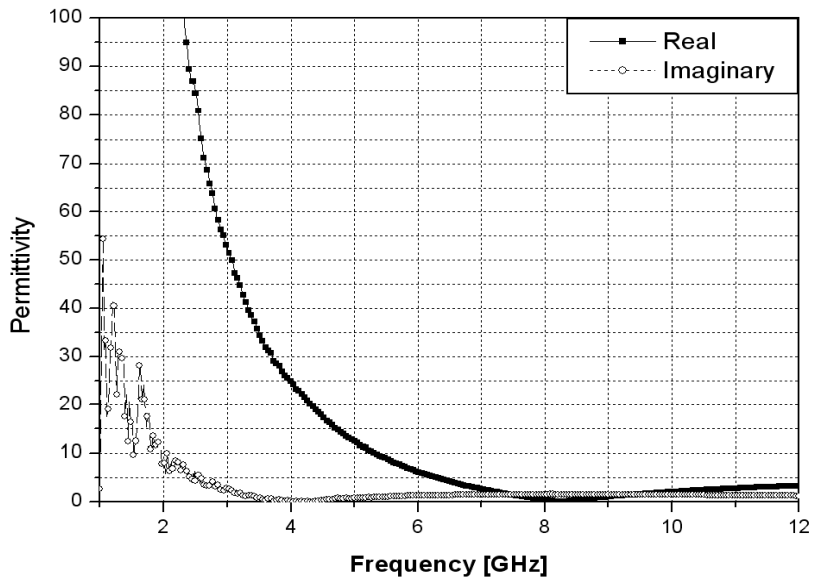


그림 3.4 복소비유전율 (Carbon : Al(OH)₃ : CPE=40 : 3 : 57 wt%)

Fig. 3.4 Complex permittivity (Carbon : Al(OH)₃ : CPE=40 : 3 : 57 wt%)

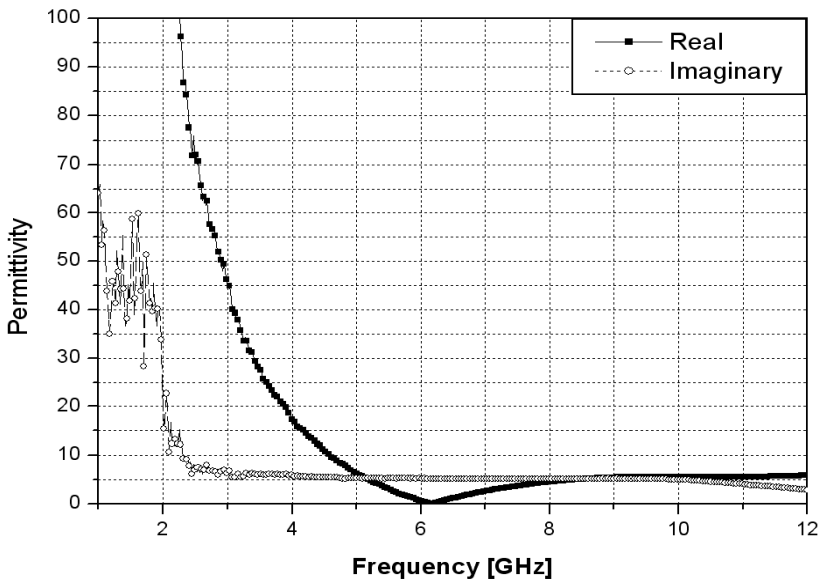


그림 3.5 복소비유전율 (Carbon : Al(OH)₃ : CPE=45 : 3 : 52 wt%)

Fig. 3.5 Complex permittivity (Carbon : Al(OH)₃ : CPE=45 : 3 : 52 wt%)

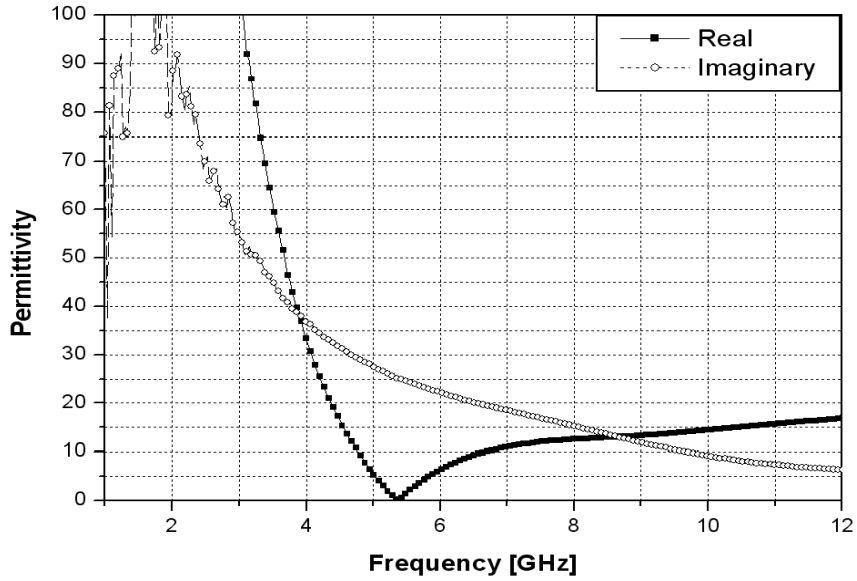


그림 3.6 복소비유전율 (Carbon : Al(OH)₃ : CPE=50 : 3 : 47 wt%)

Fig. 3.6 Complex permittivity (Carbon : Al(OH)₃ : CPE=50 : 3 : 47 wt%)

3.2 *Sendust*의 조성비에 따른 전파흡수능

전파흡수체에서 조성비의 변화는 전파흡수특성을 제어하는 중요한 인자 중 하나 이므로 본 논문에서는 조성비를 변화시켜 전파흡수체의 흡수 특성 변화를 연구하였다.

표 3. 1 전파흡수체 제조조건

Table 3. 1 Manufacturing condition of EM wave absorbers.

Sendust (wt%)	CPE (wt%)	시편두께 (mm)
75	25	1
80	20	1
85	15	1

조성비를 표 3.1과 같이 변화시킨 후 두께 1 mm로 고정한 다음 전파흡수 특성을 측정하여 그림 3.7에 나타내었다.

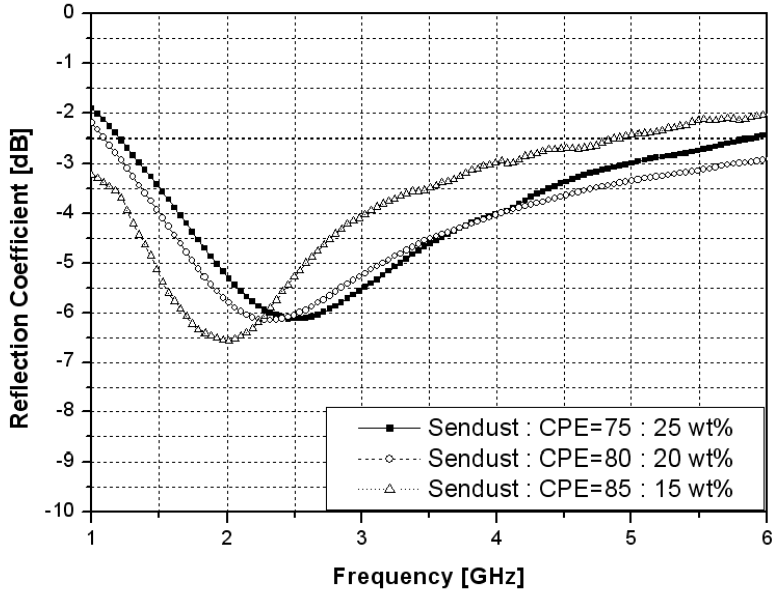


그림 3.7 Sendust 조성비에 따른 전파흡수능
 Fig. 3.7 Reflection Coefficient of sendust with various composition rate

그 결과 그림 3.7 에서와 같이 조성비가 Sendust : CPE=75 : 25 wt%는 정합 주파수 2.5 GHz에서 -6 dB의 반사계수를 나타내며 80 : 20 wt%는 2.3 GHz에서 -6.2 dB, 85 : 15 wt%는 2 GHz에서 -6.5 dB의 반사계수를 보인다. 이처럼 Sendust의 함유량이 증가함에 따라 정합주파수가 저주파 대역으로 이동함을 알 수 있으며 전파흡수능 또한 향상됨을 그림 3.7 에서와 같이 알 수 있다.

3.3 Carbon의 조성비에 따른 전파흡수능

Carbon의 경우 표 3.2와 같이 조성비를 변화시킨 후 두께 2 mm로 고정한 다음 전파흡수 특성을 측정하여 그림 3.8에 나타내었다.

표 3.2 전파흡수체 제조 조건

Table 3.2 Manufacturing condition of EM wave absorbers.

Carbon (wt%)	CPE (wt%)	시편두께 (mm)
40	60	2
45	55	2
50	50	2

그림 3.8 에서 조성비 Carbon : CPE=40 : 60 wt%는 정합주파수 10.4 GHz에서 -14 dB의 반사계수를 나타내며, 조성비 Carbon : CPE=45 : 55 wt%는 9 GHz에서 -16.5 dB, Carbon : CPE=50 : 50 wt%는 8.2 GHz에서 -12 dB의 반사계수를 보인다.

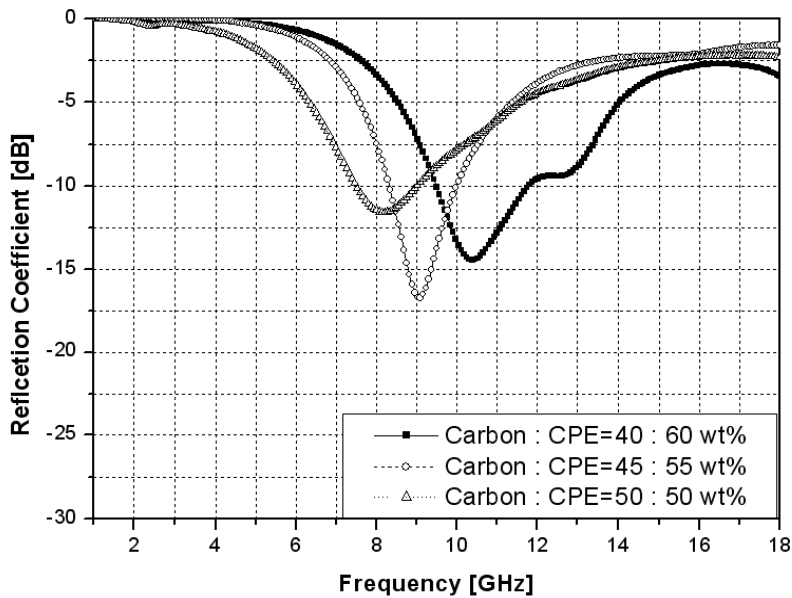


그림 3.8 Carbon 조성비에 따른 전파흡수능

Fig. 3.8 Reflection Coefficient of Carbon with various composition rate

이처럼 Carbon의 함유량이 증가함에 따라 정합주파수는 저주파 대역으로 이동함을 알 수 있다.

3.4 Sendust에 $Al(OH)_3$ 를 혼합한 전파흡수체

자성손실 재료인 Sendust에 전파흡수성능 향상을 위해 비저항이 큰 $Al(OH)_3$ 의 함유량을 0 wt%, 1 wt%, 3 wt%, 5 wt%, 7 wt%씩 함유 하여 제작한 다음 Network Analyzer를 이용하여 측정 후 그림 3.9 ~ 3.11에 나타내었다.

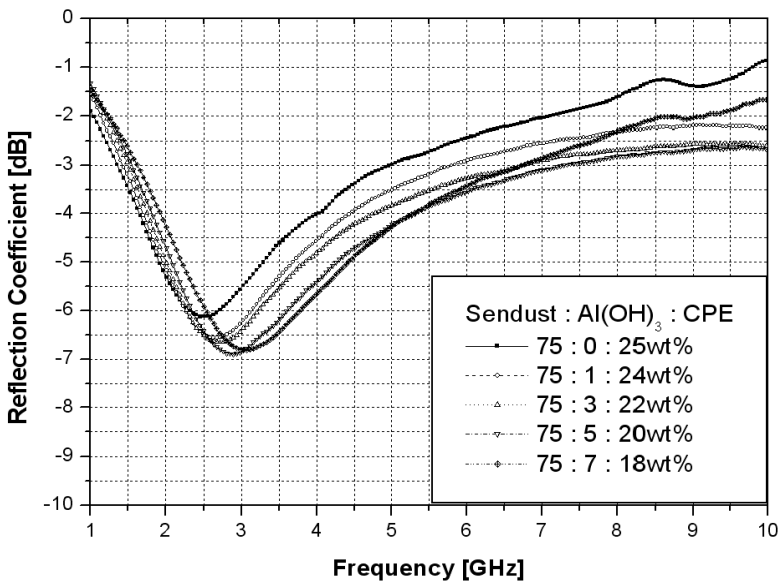


그림 3.9 Sendust에 $Al(OH)_3$ 함유량에 따른 반사계수(두께 1 mm)
 Fig. 3.9 Reflection Coefficient for sandust of 1 mm with various $Al(OH)_3$ content

그림 3.9의 경우 Sendust의 함유량을 75 wt% 일 때 $Al(OH)_3$ 를 0 wt%, 1 wt%, 3 wt%, 5 wt%, 7 wt%씩 함유하여 $Al(OH)_3$ 가 Sendust에 어떠한 특성을 보이는지를 연구하였다. 그 결과 $Al(OH)_3$ 가 함유하지 않았을 때 정합주파수 2.5 GHz에서 -6 dB의 반사계수를 보이고 있으며, 1 wt%, 3 wt%, 5 wt%, 7 wt%일 때는 각각 정합주파수가 2.6 GHz, 2.7 GHz, 2.9 GHz, 3.06 GHz에서

-6.5 dB, -6.7 dB, -6.9 dB, -6.7 dB의 반사계수를 보이고 있으며, Al(OH)₃를 혼합하지 않은 것 보다 5 wt% 혼합 한 경우 2.9 GHz에서 -6.9 dB로 반사계수가 향상 되었으며, 정합주파수 또한 고주파 쪽으로 이동함을 알 수 있다.

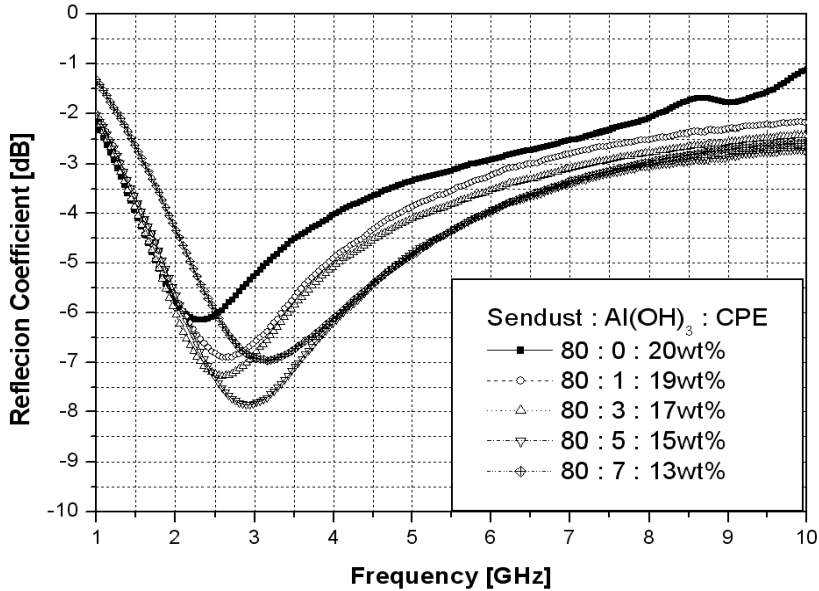


그림 3.10 Sendust에 Al(OH)₃ 함유량에 따른 반사계수(두께 1 mm)
 Fig. 3.10 Reflection Coefficient for sandust of 1 mm with various Al(OH)₃ content

그림 3.10의 경우 Sendust의 함유량을 80 wt%로 고정한 후 그림 3.9에서와 같이 Al(OH)₃를 0 wt%, 1 wt%, 3 wt%, 5 wt%, 7 wt%씩 함유하여 제작한 후 측정된 결과 그림이다. 그 결과 Al(OH)₃를 함유하지 않았을 때 정합주파수 2.27 GHz에서 -6.15 dB의 반사계수를 보이며 Al(OH)₃가 1 wt%, 3 wt%, 5 wt%, 7 wt%일 때는 각각 정합주파수 2.55 GHz, 2.6 GHz, 2.9 GHz, 3.1 GHz 일 때 -6.8 dB, -7.2 dB, -7.9 dB, -6.9 dB의 반사계수를 보이고 있으며, Al(OH)₃를 혼합하지 않은 것 보다 5 wt% 혼합한 것이 -6.15 dB에서 -7.9 dB로 반사계수가 향상 되었으며, 정합주파수 역시 고주파대역으로 이동함을 알 수 있다.

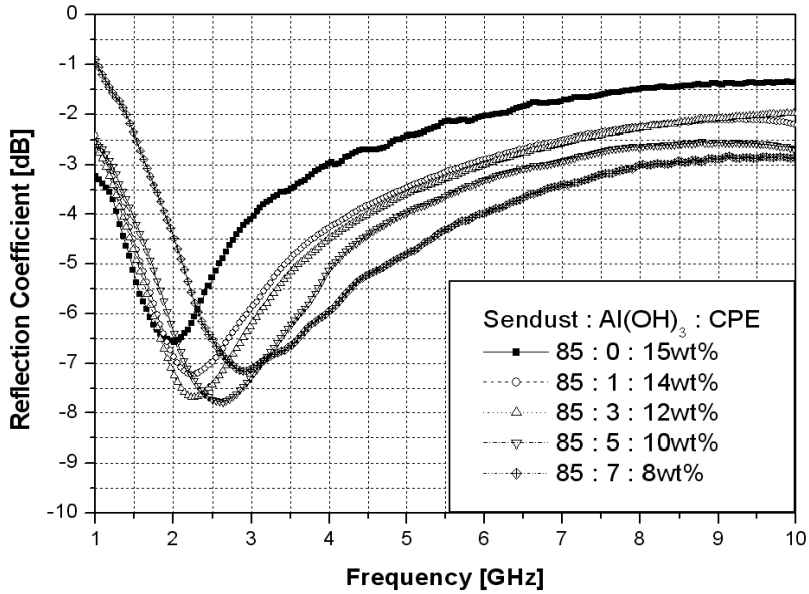


그림 3.11 Sendust에 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 함유량에 따른 반사계수(두께 1 mm)
 Fig. 3.11 Reflection Coefficient for sandust of 1 mm with various $\text{Al}(\text{OH})_3$ content

이번에는 Sendust의 함유량을 85 wt%로 고정한 후 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 함유량을 0 wt%, 1 wt%, 3 wt%, 5 wt%, 7 wt%씩 증가 시킨 후 측정된 결과를 그림 3.11에 나타내었다. 그 결과 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 를 함유하지 않은 것은 정합주파수 2 GHz에서 -6.5 dB의 반사계수를 보이고 있으며, $\text{Al}(\text{OH})_3$ 함유량을 1 wt%, 3 wt%, 5 wt%, 7 wt% 일 때는 정합주파수가 각각 2.3 GHz, 2.4 GHz, 2.6 GHz, 2.9 GHz에서 -7.2 dB, -7.7 dB, -7.8 dB, -7.1 dB의 반사계수를 보이고 있으며 그림 3.11 역시 그림 3.9 ~ 3.10과 같은 패턴으로 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 함유량이 5 wt% 일 때 특성이 가장 좋았으며, 7 wt%일 때는 반사계수가 감소함을 알 수 있다. 또한 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 함유량이 증가할수록 정합주파수는 고주파 대역으로 이동함을 알 수 있다.

3.5 Carbon에 $Al(OH)_3$ 를 혼합한 전파흡수체

도전손실 재료인 Carbon에 전파흡수능 향상을 위하여 비저항이 큰 $Al(OH)_3$ 를 0 wt%, 1 wt%, 3 wt%, 5 wt%씩 함유 하여 제작한 다음 Network Analyzer를 이용하여 측정한 후 그림 3.12에 나타내었다.

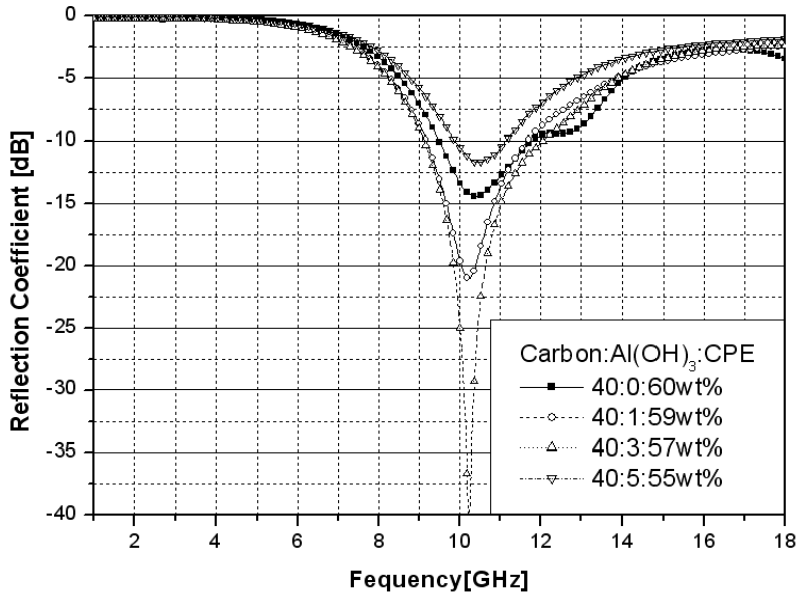


그림 3.12 Carbon의 $Al(OH)_3$ 함유량에 따른 반사계수(두께 2 mm)

Fig. 3.12 Reflection Coefficient for carbon of 2mm with various $Al(OH)_3$ content

그 결과 그림 3.12에서 $Al(OH)_3$ 를 혼합하지 않은 것은 정합주파수가 10.2 GHz에서 14 dB의 전파흡수능을 보이고 있으며 $Al(OH)_3$ 를 1 wt%, 3 wt%, 5 wt% 혼합한 것은 정합주파수가 10.2 GHz에서 -20.2 dB, -40 dB, -12 dB의 반사계수를 보이고 있다. 그림 3.12에서와 같이 $Al(OH)_3$ 가 1 wt% ~ 3 wt%까지는 반사계수가 향상 되다가 5 wt%에서는 오히려 반사계수가 떨어짐을 알 수가 있다. 이것은 비저항이 큰 $Al(OH)_3$ 로 인해 반사계수가 향상이 되는 것으로 생각되며, $Al(OH)_3$ 양이 5 wt% 일 때는 전파흡수체 표면에 표면반사가 커져서

반사계수가 감소되는 것으로 판단된다.

그림 3.13는 Carbon의 45 wt%로 고정 후 그림 3.12과 같이 Al(OH)₃를 0 wt%, 1 wt%, 3 wt%, 5 wt%씩 함유하여 제작한 후 Network Analyzer를 이용하여 측정한 그림이다.

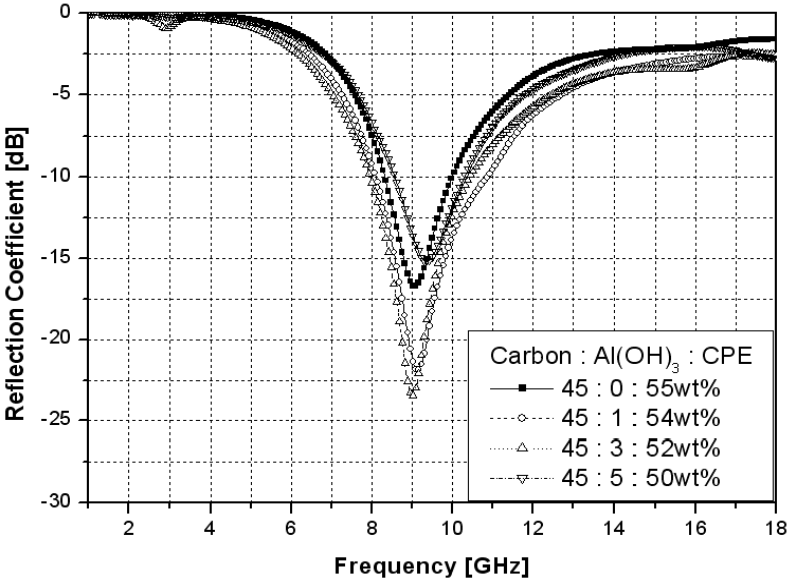


그림 3.13 Carbon의 Al(OH)₃ 함유량에 따른 반사계수(두께 2 mm)
 Fig. 3.13 Reflection Coefficient for carbon of 2 mm with various Al(OH)₃ content

그림 3.13 역시 Al(OH)₃를 혼합하지 않은 것은 정합주파수가 9 GHz에서 -17 dB의 반사계수 보이고 있으며 Al(OH)₃를 1 wt%, 3 wt%, 5 wt% 혼합한 것은 정합주파수가 9 GHz 에서 -21 dB, -23 dB, -15 dB의 반사계수를 보이고 있다. 그림 3.14는 Carbon의 조성비를 50 wt%로 고정한 후 Al(OH)₃를 0 wt%, 1 wt%, 3 wt%, 5 wt%씩 함유하여 제작한 후 측정한 결과 그림이다.

아래 그림 3.14의 결과로 부터 Al(OH)₃를 혼합하지 않은 것은 정합주파수가 9 GHz에서 17 dB의 전파흡수능을 보이고 있으며 Al(OH)₃를 1 wt%, 3 wt%, 5 wt% 혼합한 것은 정합주파수가 각각 9.2 GHz, 8.8 GHz, 9 GHz에서 -22 dB, -24 dB, -7 dB의 반사계수를 보이고 있다.

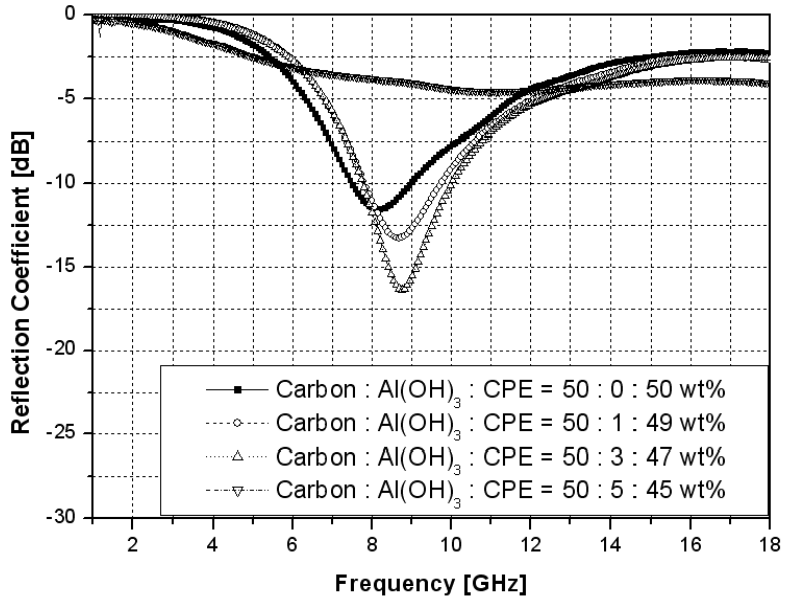


그림 3.14 Carbon의 Al(OH)₃ 함유량에 따른 반사계수(두께 2 mm)
 Fig. 3.14 Reflection Coefficient for carbon of 2 mm with various Al(OH)₃ content

따라서 그림 3.12 ~ 3.14의 결과와 같이 Al(OH)₃가 0 wt%보다 1 wt% ~ 3 wt% 함유 되었을 때 전파흡수 특성이 증가 하다가 5 wt%일 때는 오히려 감소가 되므로 최적의 Al(OH)₃ 함유량은 3 wt%가 됨을 알 수 있다.

3.6 Sendust의 두께에 따른 전파흡수능

전파흡수체의 전파흡수능에 영향을 미치는 중요한 인자로 전파흡수체의 두께를 들 수 있다. 그림 3.15는 가장 전파흡수성능이 우수한 혼합비인 Sendust : Al(OH)₃ : CPE=85 : 5 : 10 wt%의 1 mm이하 두께 변화에 따른 반사계수를 측정 한 것이다.

두께가 0.5 mm 일 때 정합주파수 3.9 GHz에서 -3.5 dB의 반사계수를 보이며 0.8 mm 일 때는 3.6 GHz에서 -5.8 dB, 마지막으로 두께가 1 mm 일 때는

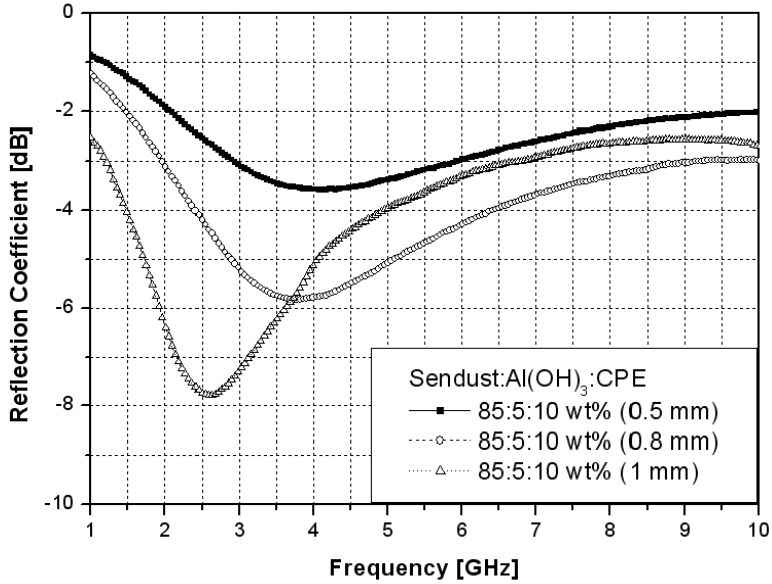


그림 3.15 두께변화에 따른 전파흡수체의 반사계수
(Sendust : Al(OH)₃ : CPE=85 : 5 : 10 wt%)

Fig. 3.15 Reflection Coefficient of EM wave absorber for various thickness

2.6 GHz에서 -7.8 dB의 반사계수를 보이는 것을 그림 3.15에서 와 같이 알 수 가 있다. 그리고 두께가 두꺼워질수록 정합주파수가 저주파대역으로 이동함을 알 수 있다.

3.7 Carbon의 두께에 따른 전파흡수능

아래 그림 3.16는 가장 전파흡수성능이 우수한 혼합비인 Carbon : Al(OH)₃ : CPE=40 : 3 : 57 wt%의 3 mm이하 두께 변화에 따른 반사계수를 측정한 것이다.

두께가 1 mm 일 때 정합주파수 18 GHz에서 -17.5 dB의 반사계수를 보이며 2 mm 일 때는 10.2 GHz에서 -40 dB, 마지막으로 두께가 3 mm 일 때는 6.3 GHz에서 -25 dB의 반사계수를 보인다.

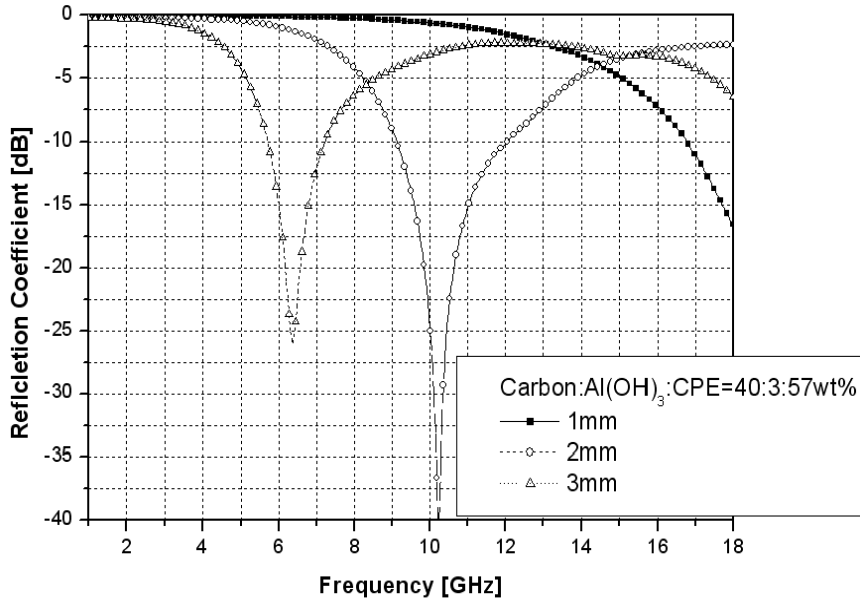


그림 3.16 두께변화에 따른 전파흡수체의 반사계수
(Carbon : Al(OH)₃ : CPE=40 : 3 : 57 wt%)

Fig. 3.16 Reflection Coefficient of EM wave absorber for various thickness

이처럼 두께가 두꺼워질수록 정합주파수는 저주파대역으로 이동함을 알 수 있다.

3.8 2층형 전파흡수체의 시뮬레이션 및 측정결과

2층형 전파흡수체를 설계하기 위해 복소비유전율과 복소비투자율을 MatLab을 이용하여 각각의 층에 대한 최적의 적층순서와 두께를 시뮬레이션 한 후 다층형 전파흡수체를 실 제작하여 전파흡수능의 향상을 꾀하였다. 그림 3.17과 그림 3.18은 조성비가 Sendust : Al(OH)₃ : CPE=85 : 5 : 10 wt% , Sendust : Al(OH)₃ : CPE=75 : 5 : 20 wt%의 전파흡수체를 적층하였다. 먼저 각 시편의 재료정수를 구하고 복소비투자율과 복소비유전율을 이용하여 적층시 최적의 두께를 예측하였다.

그림3.17은 2층형 전파흡수체의 적층순서와 각층의 최적의 두께를 나타낸 그림

이다. 도체판을 기준으로 하여 1층에 Sendust : Al(OH)₃ : CPE=85 : 5 : 10 wt% 를 위치시키고 2층에 Sendust : Al(OH)₃ : CPE=75 : 5 : 20 wt%를 적층하였다.

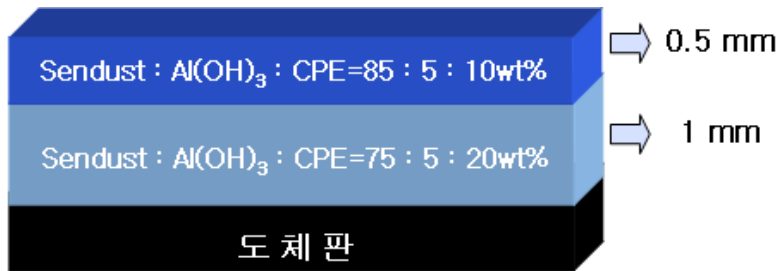


그림 3.17 2층형 전파흡수체의 두께 및 적층순서

Fig. 3.17 Thickness and sequence of the double-layer type EM wave absorber

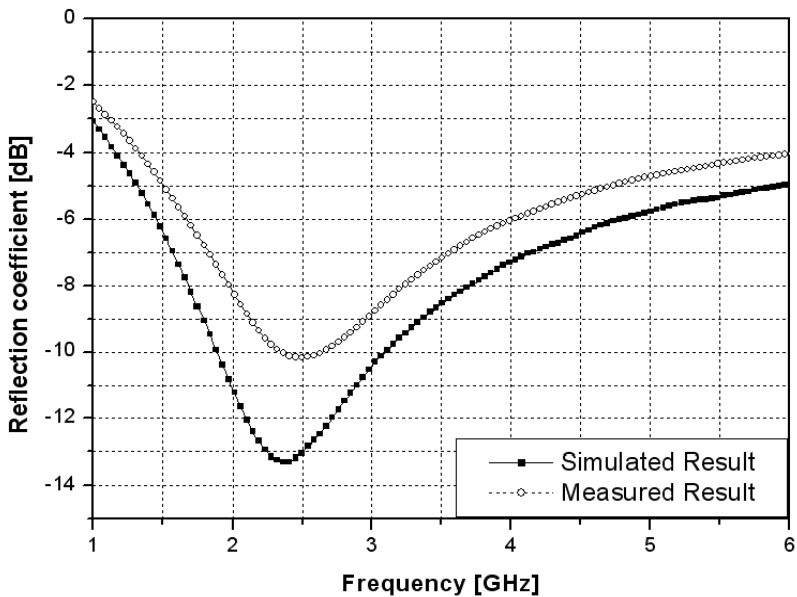


그림 3.18 2층형 전파흡수체의 시뮬레이션 값과 측정 값 비교 (두께:1.5 mm)

Fig. 3.18 Comparison of simulated and measured results of the double-type EM wave absorber

그림 3.18은 그림 3.17의 최적 적층순서와 적층 두께를 그림 3.1 ~ 그림 3.3

의 재료정수 data를 이용하여 MatLab 으로 시뮬레이션 한 후 실 측정값과 비교한 그림이다. 그 결과 시뮬레이션값은 정합주파수 2.37 GHz에서 -13.2 dB의 반사계수를 보이고 있으며, 실 측정결과는 2.5 GHz에서 -10 dB의 반사계수를 얻었다.

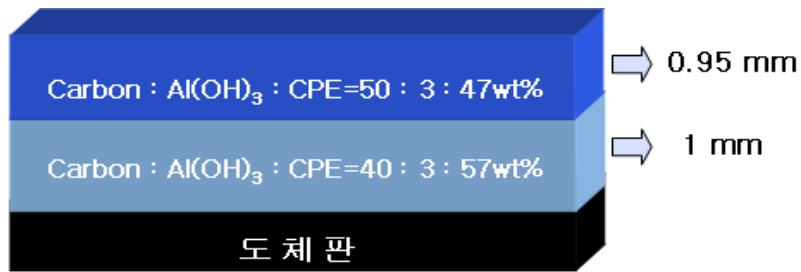


그림 3.19 2층형 전파흡수체의 두께 및 적층순서

Fig. 3.19 Thickness and sequence of the double-layer type EM wave absorber

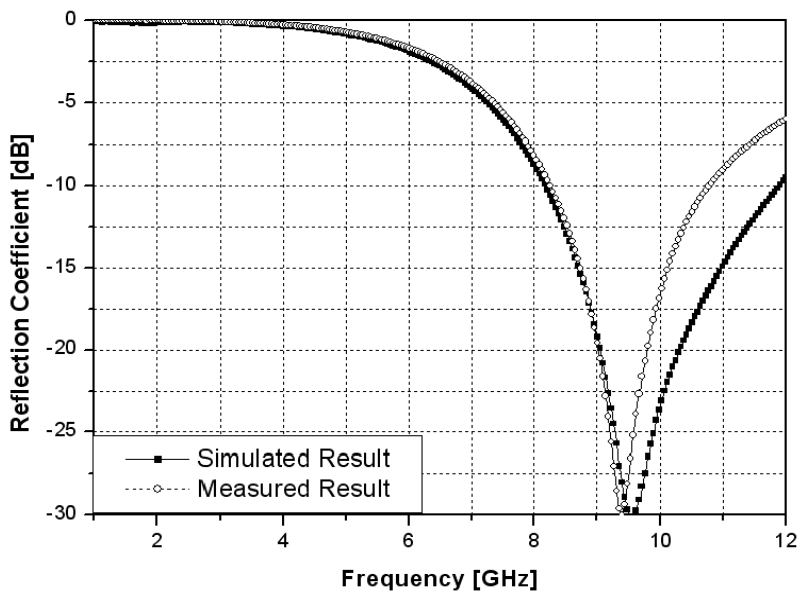


그림 3.20 2층형 전파흡수체의 시뮬레이션 값과 측정 값 비교 (두께:1.95 mm)

Fig. 3.20 Comparison of simulated and measured results of the double-type EM wave absorber

그림 3.19는 도체판을 기준으로 하여 도체판 윗층에 혼합비 Carbon : Al(OH)₃ : CPE=40 : 3 : 57 wt%를 위치시킨 다음 그 윗층에 Carbon : Al(OH)₃ : CPE=50 : 3 : 47 wt%를 적층시킨 그림이다. 그림 3.19와 같이 최적의 적층순서와 두께를 그림 3.4 ~ 3.6의 재료정수 data를 이용하여 결정한 다음 그림 3.20에 시뮬레이션 값과 실 측정값을 나타내었다.

그림 3.20의 시뮬레이션 값은 정합주파수 9.55 GHz에서 -30 dB의 반사계수를 보이고 있으며, 실 측정결과는 9.4 GHz에서 -30 dB의 반사계수를 얻었다.

제 4 장 결 론

본 논문에서는 자성손실재료인 Sendust와 도전손실재료인 Carbon에 비저항이 큰 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 를 첨가하여 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 가 전파흡수특성에 어떠한 영향을 미치는지 그리고 각각의 복소비율전유과, 복소비투자율을 이용하여 최적의 두께와 적층 순서를 고려하여 설계한 전파흡수체의 흡수특성을 고찰하기 위하여 설계·제작하여 이를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 조성비가 전파흡수특성에 어떠한 영향을 미치는지를 조사하였다.

먼저 Sendust의 경우 조성비를 Sendust : CPE=75 : 25 wt%, 80 : 20 wt%, 85 : 15 wt% 씩 변화 하여 제작 후 측정결과 Sendust : CPE=85 : 15 wt%에서 가장 우수한 특성인 2 GHz에서 6.5 dB의 전파흡수능을 얻었다. 그리고 Carbon의 경우 조성비를 Carbon : CPE=40 : 60 wt%, 45 : 55 wt%, 50 : 50 wt%씩 변화 시킨 결과 조성비 Carbon : CPE=45 : 55 wt% 일 때 주파수 9 GHz에서 16 dB의 전파흡수능을 얻었다.

(2) 자성손실재료인 Sendust와 도전손실재료인 Carbon에 전파흡수특성을 향상시키기 위하여 Sendust와 Carbon에 비저항이 큰 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 를 함유하였다. Sendust의 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 가 5 wt%일때 가장 좋은 특성을 보이며, 조성비 Sendust : $\text{Al}(\text{OH})_3$: CPE=85 : 5 : 10 wt%일 때 주파수 2.6 GHz에서 7.8 dB의 전파흡수능을 얻었다. Carbon의 경우 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 가 3 wt% 일 때 가장 우수한 특성을 보였으며, 조성비 Carbon : $\text{Al}(\text{OH})_3$: CPE=40 : 3 : 57 wt% 일 때 주파수 10.2 GHz에서 40 dB의 전파흡수능을 얻었다.

(3) Sendust의 경우 가장 우수한 전파흡수능을 보이는 혼합비 85 : 5 : 10 wt%의 두께 변화에 따른 전파흡수능을 조사하였다.

그 결과 두께 0.5 mm일 때 주파수 3.9 GHz 에서 3.5 dB의 전파흡수능을 보이며 두께 0.8 mm, 1.0 mm일 때 주파수 3.6 GHz, 2.6 GHz에서 각각 5.8 dB, 7.8 dB의 전파흡수능을 나타내었고, Carbon의 경우 혼합비 40 : 3 : 57 wt%

일 때 주파수 18 GHz 두께 1 mm에서 17 dB의 전파흡수능을 보이며 두께 2 mm, 3 mm 주파수 10.2 GHz, 6.3 GHz에서 각각 40 dB, 25 dB의 전파흡수능을 보인다. 이처럼 두께가 두꺼워 질수록 정합주파수는 저주파 대역으로 이동함을 확인 하였다..

(4) 2층형 전파흡수체가 전파흡수성능에 미치는 영향을 조사하였다.

Sendust의 경우 1층에 조성비 Sendust : $\text{Al}(\text{OH})_3$: CPE=85 : 5 : 10 wt%를 위치시키고 2층에 Sendust : $\text{Al}(\text{OH})_3$: CPE=75 : 5 : 20 wt%를 적층한 결과 두께 1.5 mm에서 실내무선랜용 주파수인 2.4 GHz에서 10 dB의 전파흡수능을 보이고 있으며, Carbon의 경우 도체판을 기준으로 하여 도체판 윗층에 혼합비 Carbon : $\text{Al}(\text{OH})_3$: CPE=40 : 3 : 57 wt%를 위치시킨 다음 그 윗층에 Carbon : $\text{Al}(\text{OH})_3$: CPE=50 : 3 : 47 wt%를 적층한 결과 두께 1.95 mm에서 X-Band 대역인 9.4 GHz에서 30 dB의 전파흡수능을 얻었다.

본 논문에서 자성손실재료인 Sendust 그리고 도전손실재료인 Carbon을 이용하여 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 함유량에 따른 전파흡수특성을 분석한 data는 전파흡수성능을 향상시키기 위해 유용한 기초자료가 될 것으로 판단되며, 향후 두 가지 재료뿐만 아니라 다양한 재료에 관해서도 더 연구가 이루어져야 하겠다.

참 고 문 헌

- [1] 김동일, 전파흡수체공학, 대영사, 2006.2.

- [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. Cheng, Field and Wave Electromagnetics, Addison-Wesley, 1992.11.

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

- [5] 김동일, 안영섭, 정세모, “레이다용 광대역형 고성능 전파흡수체의 개발에 관한 연구”, 한국향해학회지, 제15권 제1호, pp.11-9, 1991.3.

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

- [7] 김동일, 나정웅, 박동철, 전파공학, 청문각, 2002.

- [8] Eugene F.Knott, Jone F.Shaeffer, Micheal T. Tuley, Radar Cross Section, Scitech, 2004.

- [9] 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

- [10] 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.
- [11] Sang-Hyun Moon, Seung-Jea Shin, Jea-Man Song, Dong-II 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.

발 표 논 문

학술대회 발표논문

- [1] 제승훈, 최윤석, 김동일, 송재만, “전파흡수체의 전파흡수능 향상에 관한 연구”, 2005년도 추계 마이크로파 및 전파학술대회 논문집, Vol. 28 No. 2, pp. 329-332, 2005. 9.
- [2] 최창묵, 김동일, 제승훈, 최윤석, “밀리미터 레이더용 전파흡수체 개발”, 2006 춘계종합학술대회 논문집, pp. 223-227, 2006. 5.
- [3] 최윤석, 김동일, 제승훈, 최창묵, “광대역 전파흡수체에 관한 연구”, 춘계 마이크로파 및 전파전파 학술대회 논문집, Vol. 29, No 1, pp 511-514, 2005.5.
- [4] 제승훈, 김동일, 최윤석, 최창묵, “다층형 전파흡수체에 관한 연구”, 2006년도 한국전자과학기술 학회 학술대회, pp 22-25, 2006. 6.
- [5] 최윤석, 김동일, 제승훈, 최창묵, 이제현, “Carbon을 이용한 X-band 레이더용 적층형 전파흡수체 개발에 관한 연구”, 2006년도 추계 마이크로파 및 전파 학술대회 논문집, Vol. 29, No 2, pp 351-354, 2006, 9.
- [6] 제승훈, 김동일, 최윤석, 이제현, “ $Al(OH)_3$ 혼합에 의한 전파흡수성능 향상에 관한 연구”, 2006년도 한국전자과학기술 종합학술발표회 논문집, Vol. 16, No. 1, pp.373-376.

감사의 글

석사 2년 동안의 시간은 저에게 무척이나 특별하고 소중한 시간이었습니다. 얼마 다니지는 않았지만 직장을 그만두고 다시 학교로 간다는 것이 쉽지 않았던 저에게 열심히 한번 해보라고 마음속 깊이 응원해주신 할머니, 부모님 그리고 누나 동생에게 제일 먼저 감사의 뜻을 전하고 싶습니다.

오늘 이 논문이 있기 까지 저를 지도해주고 아껴주신 김동일 교수님 정말 감사드립니다.

마지막까지 저의 논문을 세심히 심사해주신 김기문 교수님, 김기만 교수님께도 감사드리며, 아울러 민경식 교수님, 윤영 교수님, 정지원 교수님, 조형래 교수님, 강인호 교수님께도 감사드립니다.

항상 잘되라고 조언을 해주신 원영수 국장님 그리고 연구실에 자주 오셔서 초코파이로 정을 나누어 주셨던 박우근 부장님께도 감사의 말씀을 전하며, 또한 마이크로파 연구실의 최고 연장자 이자 2년 동안 동거 동락한 동한이 형님, 저한테 일을 시킬 때면 비딱하게 말을 해 마음 한편에 미안한 마음이 늘 드는 창묵이 형님 제일 가까이에 위치했지만 자주 들르지 못했던 이동통신연구실의 철성이 형님, 동식이 형님께도 감사드립니다.

짧은 만남이었었지만 오랫동안 기억될 도연이형, 재현이형, 대훈이, 신자에게도 감사하단 말을 해봅니다.

언제나 자기위치에서 성실함을 보여 줬던 루이 같이 있어 편했고 든든했던 석사동기들 윤석이, 제현이 마치 석사3년차 같이 생활을 잘하는 대희, 영만이 에게도 감사하며, 짧은 기간 동안이었지만 같이 생활했던 영신이 앞으로 연구실의 주축이 될 신입생들, 오랫동안 이 연구실 생활을 해온 상미에게도 깊은 감사의 뜻을 전하며 언제나 변함이 없고 고향 같은 마이크로파 실험실에 좋은 일 만을 기원합니다.

이제 취업을 해서 자주 만나지도 전화통화도 자주 못했던 고향 친구 태호, 준호, 정훈이, 상철이 그리고 대학교 동기들... 정환이(앙뜨), 동민이, 성

석이, 정호, 정우(임치기), 대연이, 인태, 권무 먼저 졸업한 정현이, 이번에 박사과정에 진학하게 될 후배 인찬 에게도 감사 하다는 말을 전합니다.

마지막으로 저의 제일 큰 스승이시자 오늘의 저를 있기까지 묵묵히 지켜봐주시고 아껴주신 나의 가족들 부모님과 할머니께 한번더 감사의 뜻을 전합니다.

더 열심히 더 노력하여 더 좋은 모습으로 다시 볼 날을 기대하며...

2007년 추운 2월 마이크로파 연구실 에서

제 승 훈