

工學碩士 學位論文

휴대전화 단말기용 전파흡수체의 개발에 관한 연구

A Study on Development of EM Wave
Absorbers for Mobile Phones

指導教授 金 東 一

2006年 2月

韓國海洋大學校 大學院

電 波 工 學 科

鄭 在 炫

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

委 員 長 : 工 學 博 士 閔 庚 植 (印)

委 員 : 工 學 博 士 尹 榮 (印)

委 員 : 工 學 博 士 金 東 一 (印)

2006 年 2 月

韓 國 海 洋 大 學 校 大 學 院

電 波 工 學 科

鄭 在 炫

목 차

Nomenclature	iii
Abbreviations	v
Abstract	vi
제 1 장 서 론	1
1.1 연구 배경	1
1.2 연구 목적	3
제 2 장 전파흡수체 이론	5
2.1 서론	5
2.2 전파흡수체의 재료	7
2.3 전파흡수체의 종류	10
2.4 전파흡수체에 요구되는 특성	12
2.5 전파흡수체의 분포정수회로화	14
2.5.1 파동방정식	14
2.5.2 분포정수회로화	18
2.6 전파흡수체의 반사계수측정	25
2.7 재료정수 측정법	26
2.7.1 사용된 Sample Holder	26
2.7.2 재료정수 계산방법	28
제 3 장 전파흡수체의 제작 및 특성평가	31
3.1 전파흡수체의 지지재 변화에 따른 전파흡수능	31

3.2 Sendust의 배합율에 따른 전파흡수능	35
3.2.1 시편두께가 1 mm 이하 일 때의 전파흡수능	38
3.3 $Al(OH)_3$ coating양에 따른 전파흡수능의 변화	39
3.3.1 전파흡수체의 설계 및 제작	39
3.3.2 전파흡수능 평가 및 분석	40
3.4 Sendust 분쇄시간에 따른 전파흡수능의 변화	45
3.5 Sendust 표면온도 변화에 따른 전파흡수능	48
 제 4 장 결 론	 51
 참고문헌	 53
 발표논문	 54

Nomenclatures

B	:	Magnetic Flux Density Vector
C	:	Capacitance
D	:	Electric Flux Density Vector
d_n	:	Thickness of n-th Layer
E	:	Electric Field Vector
G	:	Conductance
H	:	Magnetic Field Vector
I	:	Current
J	:	Electric Conduction Current Density Vector
L	:	Inductance
R	:	Resistance
V	:	Voltage
V_1, I_1	:	Voltage, Current in the Air Region (Input)
V_2, I_2	:	Voltage, Current in Sample
Y	:	Admittance
Z	:	Impedance
Z_c	:	Characteristic Impedance
z_n	:	Input Impedance of n-th Layer
α	:	Attenuation Constant
β	:	Phase Constant
ϵ	:	Permittivity
ϵ_0	:	Permittivity of Vacuum
ϵ_{eq}	:	Equivalent Permittivity

ε_{rn}	:	Relative Permittivity of n-th Layer
γ	:	Propagation Constant
λ	:	Wavelength
μ	:	Permeability
μ_i	:	Initial Permeability
μ_{eq}	:	Equivalent Permeability
μ_{rn}	:	Relative Permeability of nth Layer
μ_0	:	Permeability of Vacuum
σ	:	Conductivity
ω	:	Angular velocity

Abbreviations

ANSI	:	American National Standards Institute
CISPR	:	International Special Committee on Radio Interference
EMC	:	Electromagnetic Compatibility
EMI	:	Electromagnetic Interference
EMS	:	Electromagnetic Susceptibility
FCC	:	Federal Communications Commission
SAR	:	Specific Absorption Rate
TEM	:	Transverse Electro Magnetic
TE	:	Transverse Electric
TM	:	Transverse Magnetic

ABSTRACT

A Study on Development of EM Wave Absorbers for Mobile Phones

The remarkable progress of electronics and radio communications technology has made our very convenient. On the other hand, the counter-measure of EMC becomes more important socially according to the increas of electromagnetic waves. It often causes TV ghost, radar false echoes by the reflected waves from adjacent constructions. Especially, in the area where strong reflectors such as high building, steel tower, iron bridge, etc. exist around radio wave facilities, the performance of such apparatus often deteriorates due to multipath interference between direct wave and reflected wave from these constructions. To meet the circumstance, the international or local regulations and rules suggest the standards for Electromagnetic Compatibility (EMC), in which there are EMI (Electromagnetic Interference) and Electromagnetic Susceptability (EMS).

Especially, it has been reported by many researchers that microwave radiated from mobile phones may be a cause of biological influence such as cancer. So, it is very important to develop absorbing and/or shielding material for preventing EMI. Ferrite or Sendust is very useful as a microwave absorbing material because its magnetic loss contributes to the microwave absorption efficiently.

This thesis deals with basic research for development of EM wave absorbers in sheet type for mobile phones. By controlling the sendust ratio, the $Al(OH)_3$ coating, the thickness, the kind of binders, and the milling time, EM wave absorbers were prepared and examined. Centerl frequency shifts toward lower with increasing thickness of the absorber, and absorption ability controlled to adjust Sendust amount. The absorption band

of the EM wave absorber coated with $Al(OH)_3$ becomes larger than that of non-coated one. Sendust composite microwave absorbers mixed with CPE were prepared at 70°C in temperature. The fabricated EM wave absorbers show a reflection coefficient 5.56 dB at 1.8 GHz in thickness of 0.85 mm.

These absorbers are expected to contribute for preventing unwanted EM wave radiation from mobile phones.

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경

현대 사회에 살고 있는 우리 주변에는 다양한 형태의 전자제어기기가 사용되고 있다. 이것은 눈에 보이지 않는 무수한 전자파가 우리 주위에 존재하고 있음을 의미한다. 특히 휴대폰의 폭발적인 증가와 전자기기의 이용 확대 및 다양화에 의해서 전파환경이 급격하게 악화되고 있으며, 이 결과 고층빌딩 등에 의한 TV 전파의 Ghost 현상, 교량 및 철교 등에 의한 선박용 레이더의 허상, 각종 산업현장에서의 기계의 오동작을 유발하거나 인체에 해를 미치는 등 여러 가지 전자파장해 (EMI ; Electromagnetic Interference) 현상을 일으키고 있다[1]. 특히 의도적 전자기장 복사를 이용하는 무선통신 및 방송 시스템 즉 방송국 송신소, 이동전화 기지국 및 이동전화 등에 대한 전자파 위험성에 대한 국민적 관심이 날로 증가하고 있다. 또한 일부에서는 고압선, 레이더, 이동전화 및 그 기지국 등에서 발생하는 전자파에 대한 노출이 건강에 해로운 결과를 초래할 수 있다는 우려를 표명해 왔고, 결과적으로 일부 국가에서는 새로운 전력선과 이동전화망의 구축이 논란의 대상이 되고 있는 실정이다.

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

이에 대한 대책으로, 국제적으로는 국제무선장해특별위원회(CISRP ; Commite International Special des Perturbations Radioelectrique), 미국에서는 미연방통신위원회(FCC ; Federal Communications Commissions), 미국국가표준협회(ANSI ; American National Standards Institute) 등에서 규제를 만들어 시행하고 있다[3].

한편, EMS(전자파내성)에 대한 규격도 차츰 엄격해져 가고 있으며, 우리나라

에서도 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 EMC (Electromagnetic Compatibility) 분야에서는 전자파환경의 정량화, 전자계 분포의 측정 및 저자펄스의 측정이 등이 필요하다.

이렇게 전자파 장해 문제를 해결하고자 하는 노력이 활발히 이루어지고 있으며 일부에서는 많은 성과를 이루고 있다. 이와 같은 성과에도 불구하고 휴대전화에서 발생하는 유해 전자파에 대한 우려가 잇따라 발표되면서 이를 해결하고자 하는 연구가 지속적으로 이루어지고 있다. 현재 휴대전화 산업은 우리 경제의 한 축을 이루고 있을 정도로 그 규모가 성장하였으며 또한 우리나라의 휴대전화 이용자 수는 전체 인구의 반이 넘는 것으로 조사되고 있고, 특히 청소년층도 폭넓게 이용하고 있는 것으로 발표되고 있다. 따라서 휴대전화에서 발생하는 유해 전자파에 대한 대책은 휴대전화 산업이 우리 경제에서 차지하는 비중과 국민 건강을 고려할 때 매우 절실하다 할 수 있다.

1.2 연구 목적

현재 전자파 장해 대책을 위한 전파흡수체는 TV 고스트 방지용 전파흡수체, 레이더 전파의 흡수를 위한 RAM 및 각종 전자기기로부터의 전파누설 방지용 등으로 널리 사용된다. 하지만 주원료로 이용되는 ferrite 외의 자성재료를 이용한 전파흡수체에 대한 연구는 그리 많지 않다. 특히 단층의 sheet형 전파흡수체의 전파흡수능 향상과 광대역화를 위한 연구가 조성변화에 따른 흡수특성 변화를 중심으로 이루어지고 있다. 그러나 같은 조성을 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(ferrite)같은 주로 자성재료를 기초로 하여 이루어지고 있다[4]. 일반적으로는 soft ferrites인 Mn-Zn ferrites와 Ni-Zn 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. 더구나 전자기기의 급격한 고주파화 추세를 감안하면 GHz 대역용 전파흡수체의 개발에 관한 연구는 매우 중요하다. 그러나 아직까지는 이러한 한정된 재료만을 이용하고 있어 다양한 각도에서의 연구개발이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 지금까지 전파흡수체에 대표적인 재료로 사용되어 오던 ferrites를 대신하여 처음으로 자성손실재료인 Sendust를 CPE와 혼합한 전파흡수체를 제작하여 그 특성을 조사하였다. 전파흡수체를 개발하는데 있어 새로운 재료인 Sendust를 사용함으로써 새로운 전파흡수체 재료의 개발 가능성을 제시하였고, 이를 이용한 휴대 전화기용 전파흡수체를 개발하였다.

휴대전화에서 발생하는 유해 전자파가 지금까지는 휴대전화 전자파의 인체 유해성이 분명하게 입증된 사례는 없으나, 뇌종양과 기억력 감퇴 등을 불러올 우려가 높은 것으로 지적되고 있으며 동물실험에서는 유해하다는 결과들이 잇따라 발표되면서 이를 해결하고자 하는 연구가 지속적으로 이루어지고 있다. 따라서 실용적인 면을 고려한 휴대전화기용 전파흡수체를 개발하는데 그 목적을 두었으며, 최종적으로 휴대전화기용 주파수인 1.8 GHz에서 두께가 1 mm 이하 이면서 전파흡수능은 5 dB 이상을 가지는 전파흡수체 개발을 목표로 하였다. 이를 위해 초투자율이 30.000인 Sendust를 시편제작온도, 두께 변화, 분쇄시간 등을 제어하고 이들과 전파흡수능과의 상관관계를 연구하였다. 또한 단층의 sheet형 전파흡수체의 전파흡수능 향상과 광대역화를 위하여 첨가제인 $Al(OH)_3$ coating 함유량을 변화시켜 전파흡수체의 전파흡수능에 미치는 영향을 조사함으로써 전파흡수능 향상과 광대역 가능성을 입증하고자 한다.

제 2 장 전파흡수체 이론

2.1 서 론

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 법규적인 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 발진기가 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 발진기 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 흡수체를 개발할 필요가 있다.

따라서, 금후 30 MHz 이상의 주파수를 만족하는 두께가 얇은 흡수체의 개발 연구가 필요하고 이것이 제 4세대라고 불릴 수 있다.

전파의 흡수란 전파에너지가 열에너지로 변환되는 현상이며 이와 같은 현상을 적극적으로 이용하여 반사파가 생기지 않게 하는 특수재료가 전파흡수체이다. 이상적인 전파흡수체는 입사해온 전파에너지를 모두 열에너지로 변환시키

는 것이다[5]. 당초에는 적의 레이더에 잠수함이나 비행기가 탐지되지 않도록 하는 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 광학 실험실의 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 흡수체 내부의 임피던스를 공간의 임피던스와 정합되도록 설계하면 공간의 전파에너지가 흡수되어 열에너지로 변하게 되는 것이다. 결과적으로 전파흡수체는 도달하는 전파에너지를 전부 또는 어느 특정한 값 이하로 반사를 제한하기 위하여 필요한 것이다. 이와 같이 반사를 제한하기 위해서는 입사되는 전파에너지를 열에너지로 변화 시켜야만 한다. 불필요한 전파를 내지 않거나 또는 반사를 하지 않도록 하는 재료로는 주로 양도체의 금속 또는 저항체, 손실재료 등이 있다. 손실재료의 분포정수회로(전송선로)의 기본식과 평면파의 미분방정식을 비교해보면 저항과 컨덕턴스는 각각 복소투자율의 허수항과 복소유전율의 허수항에 대치되며 도전율은 복소유전율의 허수항에 추가된다. 결국 도전손실재 σ , 자성

손실재 μ'' , 유전손실재 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) 전파 1회 밖에 손실재료에 부딪히지 않는 경우 : 그 대표적인 예는 TV 신호의 반사 방지에 사용되는 손실재이다.
- 3) 어떤 정해진 통로(전송선로)를 통과하는 전자파에 손실을 부여하는 경우 : 그 대표적인 예로는 동축케이블 주위에 붙인 손실재나 전자레인지용 누설방지 손실재가 있다.

이와 같이 전파흡수체는 단일재료 또는 여러 가지 재료의 조합으로 필요한 용도에 따라 제작된다. 전파흡수체 제작에 기본이 되는 사항은 주파수, 재료정수, 두께 등을 이용하여 구하고자 하는 임피던스에 맞게 설계하여 정합을 시키는 것이다.

2.2 전파흡수체의 재료

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

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

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

한 유전체 시트 등이 있다.

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

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

여기서 위에서 3가지로 분류한 전파흡수재료의 차이를 전기적 재료정수의 관점에서 서술해보자.

우선, 앞에서 서술한 바와 같이 전파손실을 갖는(전파흡수를 일으킴) 재료의 유전율과 투자율은 복소수로 표시되고 그 복소 비유전율은 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.

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

따라서 ϵ_r'' 와 μ_r'' 중에 적어도 한편이 0이 아닌 것이 전파흡수를 일으키는 것

이 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 0 이든 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.

다음에 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 다음식으로 표현된다.

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

여기서, ε_0 는 진공의 유전율로 $\varepsilon_0 = 8.85418782 \times 10^{-12} [\text{F/m}]$, ω 는 각주파수 ($\omega = 2\pi f$)이다. 그래서 사용하는 전파의 주파수에 있어서도 이 식을 만족하는 재료 혹은 근사적으로 이 식에 가까운 재료를 도전성 전파흡수재료라 말한다.

이것에 대해 유전체에 손실분말 등을 혼합한 재료는 식 (2-4)를 만족하지 않는다. 그 이유는 혼합매체에서는 저항체가 유전체 중에 분산된 형으로 되기 때문에 그 등가회로는 복잡하게 된다고 예상된다. 따라서 직류에서는 전류가 거의 흐르지 않기 때문에 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 매질에서는 만족하지 않는다. 이와 같이 식 (2-4)를 만족시키지 않는 재료를 유전성 전파흡수재료라 부르는 것이다.

2.3 전파흡수체의 종류

(1) 전파 방해방지 대책용 전파흡수체

고층 건축물에 의한 텔레비전 고스트(ghost) 문제는 사회적 문제까지 되고 있다. 그 대책으로서 안테나의 지향성을 개선하거나 TV 수상기내에서 소거하는 방법, 또는 SHF대에 의한 재방송등이 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)으로서, 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 발생한 전파는 벽면에서 흡수되어 반사파가 생기지 않으므로 전파적으로 보면 무한 공간과 등가가 된다. 따라서 종래부터 안테나의 지향성 실험 등의 목적을 위해서 건설되어 왔다. 더욱이 최근의 전자파 환경문제를 위해 각종 전자기기로부터의 방사전자파 평가시험을 위한 전파암실이나 밀리미터파대의 연구개발에 맞추어 그 사양이 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 높아져 가고 있다. 이러한 배경에서 밀리미터파 전파흡수체의 연구도 활발해져서 35 GHz대나 60 GHz대 나아가서는 94 GHz대용 고무시트계 흡수체나 저항피막형 전파흡수체의 연구가 진행되고 있다. 한 예로서 사무실이나 공장 등의 실내에서의 밀리미터파를 이용한 무선 LAN의 경우 밀리미터파 전파흡수체를 천정이나 바닥의 벽면에 장착하여 전파가 이들로부터 다중 반사하는 것을 막아 정보전달의 오류율(error rate)을 적게 하고 있다. 나아가서 최근 전자파의 인체에 대한 영향에 관해서는 우려하는 목소리가 높아지고 있다. 이러한 배경에서 인체의 전파흡수율(SAR ; Specific Absorption Rate)을 규명하는 연구가 행해지고 있으며, 이러한 분야에 있어서도 전파흡수체의 역할은 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 사용목적에 따라 다르지만 단층구조에서는 충분한 특성이 얻어지지 않기 때문에 보다 나은 특성을 달성하기 위해 다층구조로 하는 것이 많다.

다음은 일반적으로 전파흡수체에 요구되는 특성을 간단히 설명한 것이다.

(1) 사용주파수가 높을 것

모든 주파수에 대해 허용반사계수 이하로 하는 것은 불가능하므로 필연적으로 사용주파수가 한정된다. 그래서 가능한 한 사용주파수가 넓은 것이 좋다. 단, 주파수에 따라서 대역폭이 다르므로 주파수의 관점에서 본 전파흡수체의 모양은 사용주파수폭 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 flexible한 sheet이다.

(3) 편파특성이 뛰어날 것

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

(4) 가벼울 것

전파흡수체는 전파무향실의 벽이나 천정에 사용하거나 고층건물이 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 안된다.

(6) 내후성(耐朽性)이 뛰어날 것

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

2.5 전파함수체 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.

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

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

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

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

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 실제적으로 평면파는 물리적으로 실현할 수 없는 파동이 된다. 미소 전류원에 의한 파동방정식의 해에 주목해보면 구면파는 $r^{-1}e^{-jkr}$ 의 인자를 가지는데 포인팅 벡터로 방사전력총량을 구하면 유한치가 된다. 거리가 매우 큰 곳에서는 거리를 조금 변화시켜도 거리의 변화율은 극히 적다. 이것에 대하여 e^{-jkr} 항은 거리의 미소 변화에도 민감하게 변한다. 따라서 전류원으로부터 멀리 떨어진 곳에서의 구면파를 부분적으로 조사 할 때는 수식적으로 간단하기 때문에 평면파로 취급할 수 있게 된다.

(2) 분포정수회로의 파동방정식

다음으로 일반적인 전송선로의 분포정수회로에 대하여 생각해본다. 높은 주파수대역에서 두 개 이상의 도체로 구성된 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

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

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

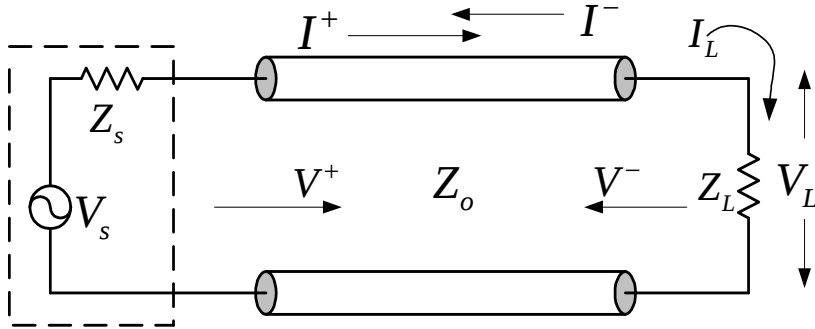


그림 2.1 일반적인 전송선로

Fig. 2.1 General Transmission Line.

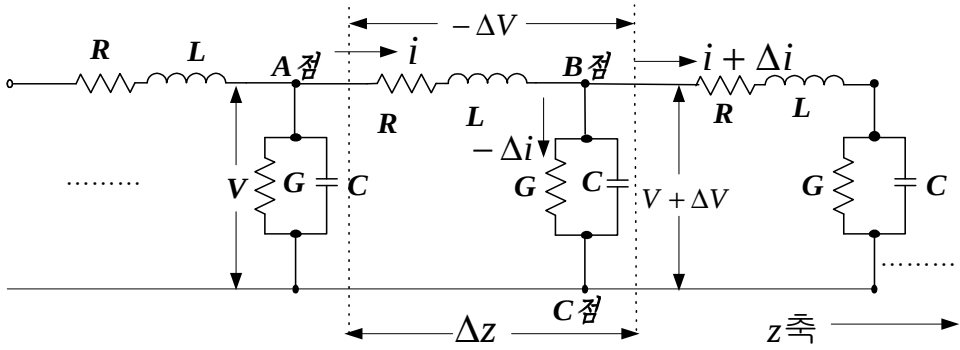


그림 2.2 일반적인 전송선로의 등가회로

Fig. 2.2 Equivalent Circuit of General Transmission Line

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

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

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

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 분포정수회로의 기본식을 표현하면

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

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

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

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

이 되어 식 (2.29)~식 (2.32)를 비교하면 같은 형태의 식으로 대응한다.

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

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

으로 되고, 이러한 대응관계를 분포정수회로의 전파정수에 적용하면

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

이 되며, 또한 선로 특성임피던스는

$$\begin{aligned} Z_C &= \sqrt{\frac{Z_s}{Y_p}} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} = \sqrt{\frac{(\omega\mu'' + j\omega\mu')}{(\omega\varepsilon'' + j\omega\varepsilon')}} = \sqrt{\frac{\mu' - j\mu''}{\varepsilon' - j\varepsilon''}} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \\ Z_C &= \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} = \sqrt{\frac{\mu_o\mu_r}{\varepsilon_o\varepsilon_r}} \end{aligned} \quad (2.35)$$

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 각각

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

$$\begin{aligned} \gamma &= \sqrt{ZY} = \sqrt{(R+j\omega L)(G+j\omega C)} = \sqrt{\omega\mu'' + j\omega\mu'}(\omega\varepsilon'' + j\omega\varepsilon') \\ &= \sqrt{j\omega(\mu' - j\mu'')j\omega(\varepsilon' - j\varepsilon'')} = j\omega \sqrt{(\mu' - j\mu'')(\varepsilon' - j\varepsilon'')} \\ &= j\omega \sqrt{\varepsilon\mu} = j2\pi f \sqrt{\varepsilon\mu} = j2\pi \frac{\sqrt{\varepsilon\mu}}{\lambda \sqrt{\varepsilon_o \mu_o}} = j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\varepsilon_r \mu_r} \end{aligned} \quad (2.41)$$

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 놓여진 것으로 된다. 여기에 사용된 재료정수는 투자율 μ 와 유전율 ϵ 을 가지고 있다. 이들 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

$$Z(d) = \frac{V(d)}{I(d)} = Z_c \frac{Z_L + Z_c \tanh \gamma d}{Z_c + Z_L \tanh \gamma d} \quad (2.42)$$

가 된다.

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

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

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 떨어진 흡수체 표면에서의 임피던스는

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

정규화(normalized)시키면

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

이 된다.

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

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

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

$$\Gamma_I(z) = \frac{-V^- e^{-\gamma z}/Z_0}{V^+ e^{\gamma z}/Z_0} = -\frac{V^-}{V^+} e^{-2\gamma z} = -\Gamma_V(z) \quad (2.47)$$

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 부하단을 본 임피던스는

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

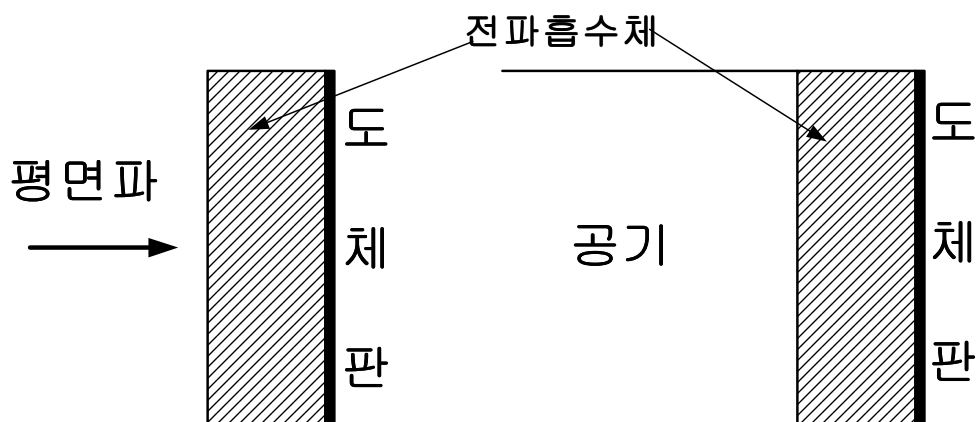
정규화 시키면

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

또 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 극단적으로 0이면 무반사이므로 전자파 에너지의 완전 흡수가 일어나고 Γ 가 1이면 완전반사로 전파흡수는 일어나지 않는다[6].



(a) 1매의 전파흡수체

(b) (a)의 분포정수회로화

그림 2.3 전파흡수의 기본 구성

Fig. 2.3 Basic Composition of Electromagnetic Wave Absorber.

2.6 전파흡수체의 반사계수 측정

본 논문에서 제작된 Sheet형 전파흡수체 반사계수를 측정하는데 사용되는 장비는 다음과 같다. 반사계수 측정법에 사용되는 장비는 그림(2.4)의 Network Analyzer와 그림(2.5)의 Sample Holder가 사용된다.



그림 2.4 HP(Hewlett Packard) 8753D 네트워크 아날라이저
Fig. 2.4 HP(Hewlett Packard) 8753D Network Analyzer.



그림 2.5 Wiltron사의 Sample Holder
Fig. 2.5 Sample Holder of Wiltron.

2.7 재료정수 측정법

2.7.1 사용된 Sample Holder

그림 2.6은 One-Port Method $\ell-2\ell$ 법을 사용하여 흡수체의 전파흡수능과 재료정수를 측정할 시료의 2mm, 4mm Sample 도면이다. 그림 2.7은 시료를 측정할 수 있도록 만들어진 Sample Holder의 단면(a)와 위에서 본 평면(b)의 그림이다. 진하게 칠해져 있는 부분이 Sample이 삽입되는 곳이며 이 Holder는 Network Analyzer(HP:8753D)와의 연결시 틈이 없는 Sample Holder이다.

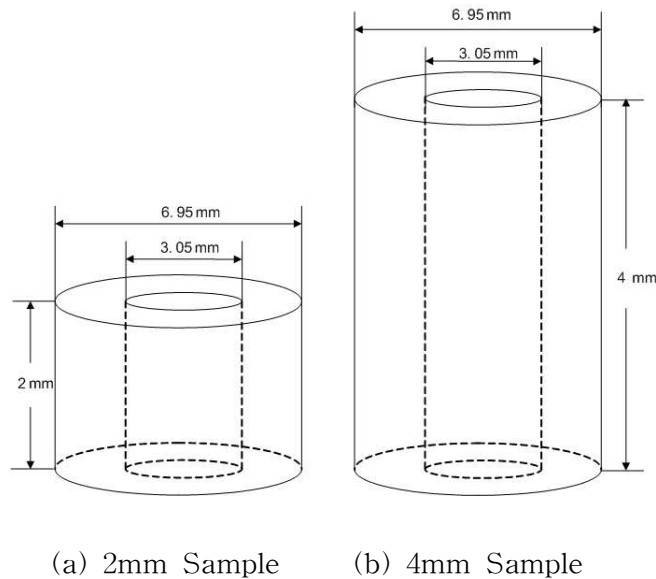
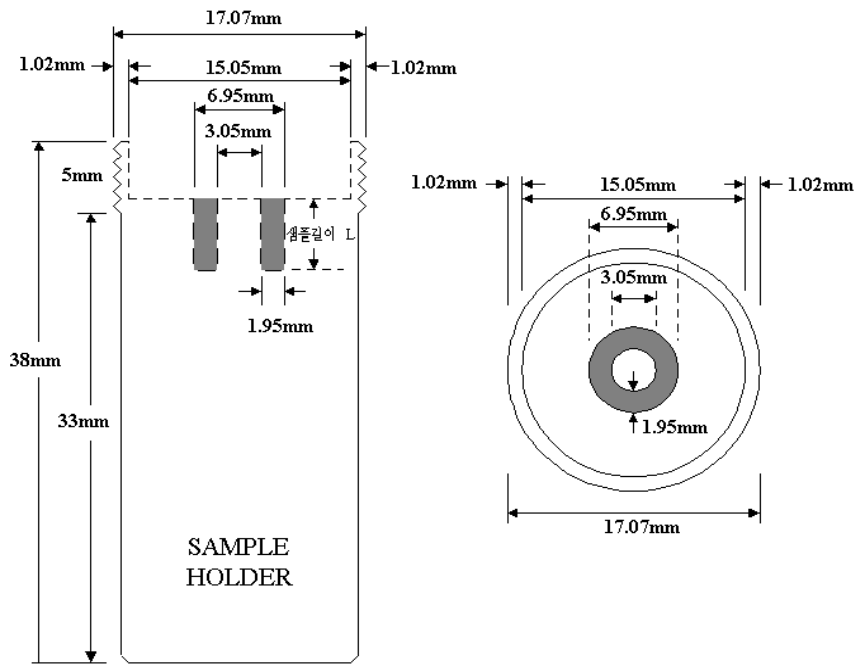


그림 2.6 제작된 Sample 도면 (a) 2mm (b) 4mm

Fig. 2.6 Manufactured sample (a) 2mm and (b) 4mm.



(a) Sample Hplder의 단면

(b) Sample Holder의 평면

그림 2.7 Sample Holder 단면도와 평면도

Fig. 2.7 Sample Holder (a) Section, (b) Plane.

2.7.2 재료정수 계산방법

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

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

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

우선 그림(2.8) 과 같이 Sample 길이가 ℓ 일 때의 임피던스는

$$Z(\ell) = \frac{1 + S_{11}(\ell)}{1 - S_{11}(\ell)} \quad (2.52)$$

와 같이 구해진다.

그림(2.9) 와 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 (2.53)과 같다.

$$Z(2\ell) = \frac{1 + S_{11}(2\ell)}{1 - S_{11}(2\ell)} \quad (2.53)$$

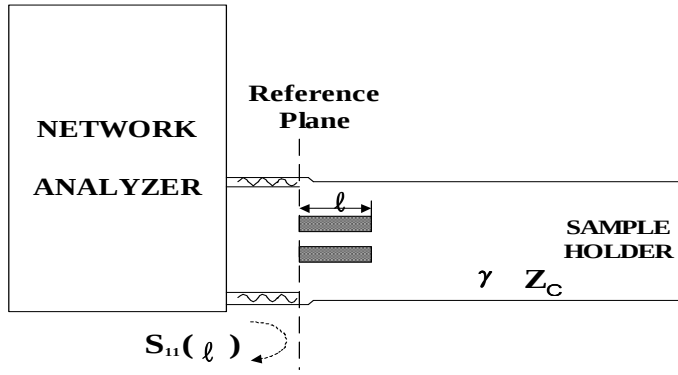


그림 2.8 샘플의 길이가 ℓ 인 Sample Holder
 Fig. 2.8 Sample Holder with sample length ℓ .

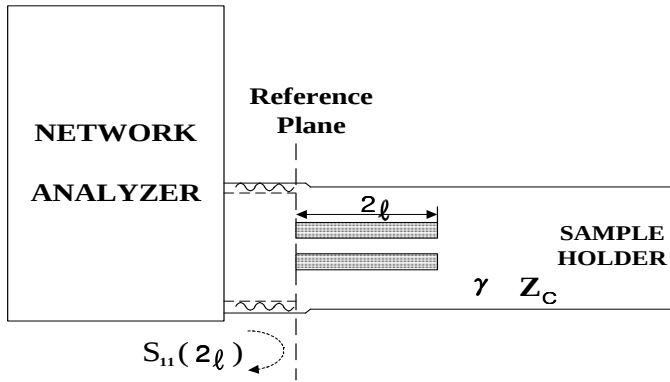


그림 2.9 샘플의 길이가 2ℓ 인 Sample Holder
 Fig. 2.9 Sample Holder with sample length 2ℓ .

한편 Network Analyzer의 Port와 Sample Holder는 틈이 없이 밀착되므로 식 (2.54)와 식 (2.55)는

$$Z(\ell) = Z_c \tanh(\gamma \ell) \quad (2.54)$$

$$Z(2\ell) = Z_c \tanh(2\gamma \ell) \quad (2.55)$$

와 같이 쓸 수 있다. 식 (2.54)과 식 (2.55)에 하이퍼볼릭 탄젠트 공식을 적용하면,

$$\tanh(2\gamma\ell) = \frac{2\tanh(\gamma\ell)}{1+\tanh^2(\gamma\ell)} \quad (2.56)$$

이 되고, 식 (2.56)을 변형하면

$$Z(2\ell) = \frac{2\tanh(\gamma\ell)}{1+\tanh^2(\gamma\ell)} \quad (2.57)$$

$$\tanh(r\ell) = \sqrt{\frac{2Z\ell - Z(2\ell)}{Z(2\ell)}} \quad (2.58)$$

이 된다. 식 (2.58)로부터 γ , Z_c 을 도출하면

$$\gamma = \frac{1}{\ell} \tanh^{-1} \sqrt{\frac{2Z(\ell) - Z(2\ell)}{Z(2\ell)}} \quad (2.59)$$

$$Z_c = Z(\ell) \sqrt{\frac{Z(2\ell)}{2Z(\ell) - Z(2\ell)}} \quad (2.60)$$

이 된다. 식 (2.59)와 식 (2.60)을 대입해서 풀면

$$\varepsilon_\gamma = -j \frac{C}{2\pi f} \cdot \frac{\frac{1}{\ell} \tanh^{-1} \sqrt{\frac{2Z(\ell) - Z(2\ell)}{Z(2\ell)}}}{Z(\ell) \sqrt{\frac{2Z(\ell)}{2Z(\ell) - Z(2\ell)}}} \quad (2.61)$$

$$\begin{aligned} \mu_\gamma = & -j \frac{C}{2\pi f} \cdot \frac{1}{\ell} \tanh^{-1} \sqrt{\frac{2Z(\ell) - Z(2\ell)}{Z(2\ell)}} \\ & \cdot Z(\ell) \sqrt{\frac{2Z(\ell) - Z(2\ell)}{Z(2\ell)}} \end{aligned} \quad (2.62)$$

이 구하여진다[7].

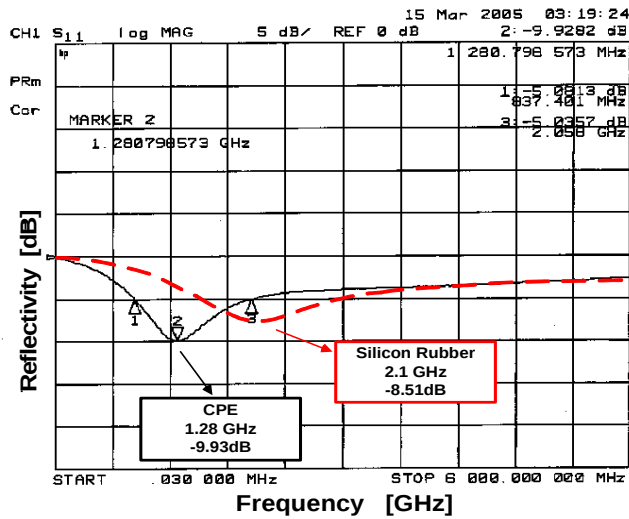
제 3 장 전파흡수체의 제작 및 특성평가

본 논문에서는 초투자율이 30.000인 Sendust를 이용하여 휴대전화 단말기의 사용 중심주파수인 1.8 GHz에서 나타나는 전파흡수 특성을 분석하였다. Sendust의 입자크기 및 모양의 변화에 따른 전파흡수특성을 조사하기 위해 분쇄시간을 달리하여 휴대전화기용 특정주파수에서 나타내는 특성을 비교 분석하였으며, 또한 단층의 Sheet형 전파흡수체의 전파흡수능 향상과 광대역화를 위하여 Sendust의 표면에 비저항이 큰 $Al(OH)_3$ 를 각각 10 wt%, 15 wt%, 20 wt%로 코팅하여 전파흡수능과 대역폭의 변화에 미치는 영향에 대해서 자세하게 검토하였다. 일반적으로 전파흡수체의 제작시 시편 온도가 증가함에 따라 전파흡수능은 향상된다고 보고되고 있다[12].

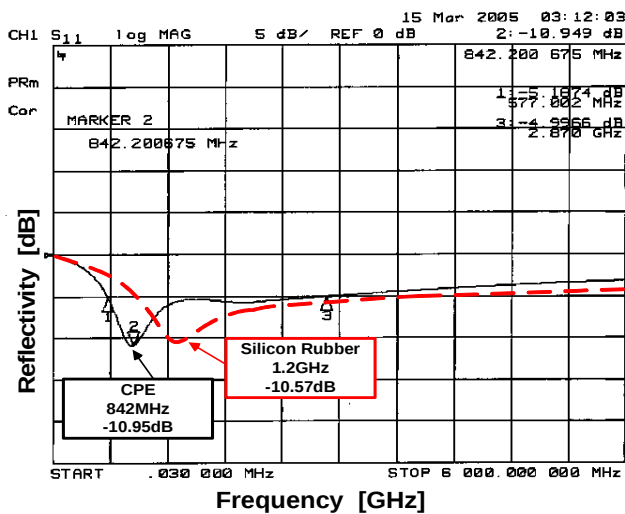
따라서 압력은 일정하게 제어를 하고 완성된 전파흡수체의 표면온도를 변화시키면서 전파흡수능의 향상과 광대역화를 비교 분석하였다.

3.1 전파흡수체의 지지재 변화에 따른 전파흡수능

전파흡수체 제작시 대표적으로 사용되어지는 지지재로는 Silicon Rubber와 CPE(Chlorinated Poly-ethylene)가 있다. 본 실험에서는 이런 지지재에 따른 전파흡수체의 전파흡수능을 조사하기 위해 Sendust : Silicon Rubber= 80 : 20 wt% 혹은 Sendust : CPE= 80 : 20 wt%로 각각 혼합을 한 후 두께별로 전파흡수능을 측정하여 이를 그림 3.1에 나타내었다. 그리고 각 샘플의 재료정수를 측정하기 위해 Network Analyzer를 이용하여 각각의 반사계수를 측정한 다음 재료정수를 계산하였다. 재료정수는 측정된 반사계수 데이터를 Matlab 프로그램으로 계산을 하였다.



(a) 시편두께 2mm



(b) 시편두께 3mm

그림 3.1 (a) 시편두께 2mm (b) 시편두께 3mm에 대한 주파수를
함수로 하는 반사계수

Fig. 3.1 Reflection coefficient as a function of frequency for samples
with the binder of various thickness (a) 2mm and (b) 3mm.

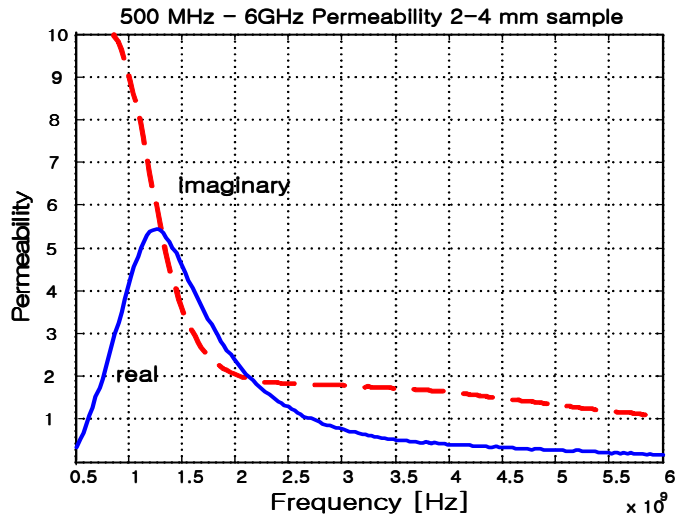
그림 3.1은 지지재를 각각 Silicon Rubber, CPE로 하고 여기에 Sendust를 혼합비 Sendust : Silicon Rubber = 80 : 20 wt%, Sendust : CPE = 80 : 20 wt%으로 혼합하여 각각 2mm, 3mm의 두께를 갖는 전파흡수체를 제작한 후 이들의 전파흡수능을 측정한 그래프이다.

전체적으로 CPE를 지지재로 한 전파흡수체가 저주파에서 우수한 전파흡수능을 나타내고 있음을 알 수 있다.

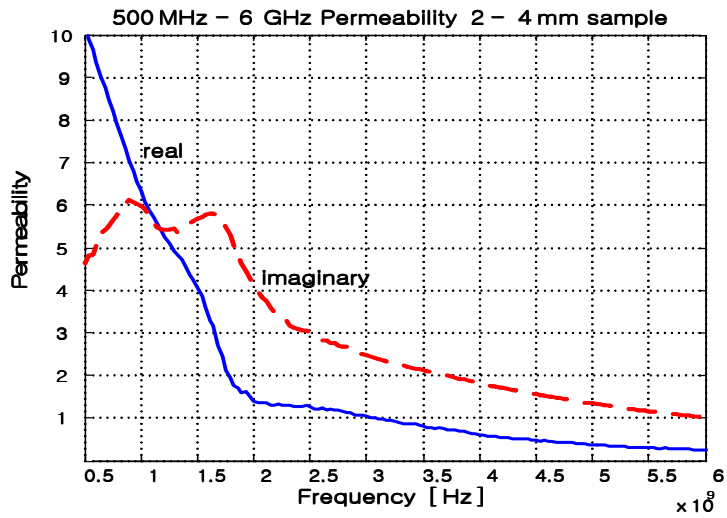
이는 휴대전화기의 사용주파수가 1.8 GHz임을 감안할 때 Silicon Rubber에 비해 CPE(Chlorinated Poly-ethylene)가 성능 및 실용적인 면에서 좀 더 우수하다고 할 수 있겠다.

자성손실재료로 하는 전파흡수체의 흡수능은 $\tan\delta = \mu''/\mu' > 1$ 일 때 즉 투자율의 허수부가 실수부보다 큰 영역에서 효과적인 흡수능을 나타낸다고 보고되고 있다[8].

따라서 그림 3.2 는 이들 시편에 대해서 주파수를 함수로 하는 투자율을 조사한 그래프로써 두 시편 모두 $\tan\delta = 1$ 을 나타내는 주파수가 1 GHz ~ 1.5 GHz 부근임을 볼 때 본 연구에서 제작한 시편 모두 이 사실과 일치하고 있음을 알 수 있다.



(a) Silicon Rubber와 혼합된 Sendust 전파흡수체의 주파수를 함수로 하는 복소투자율



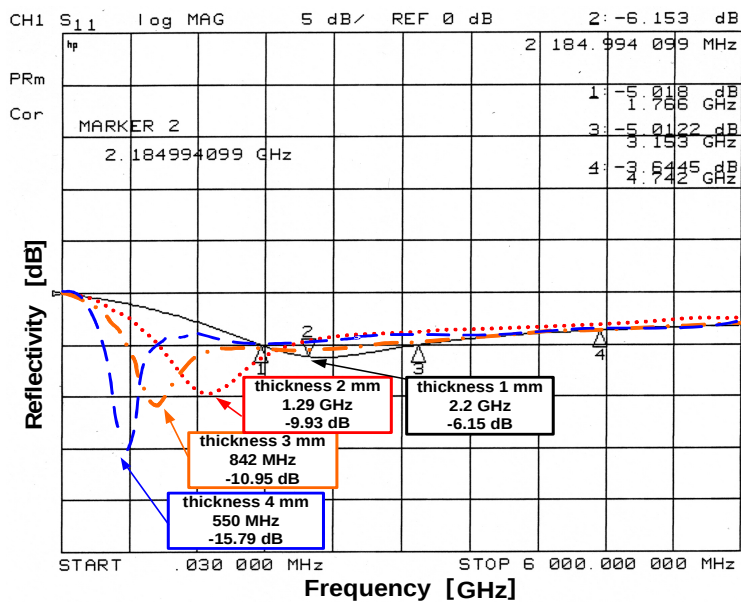
(b) CPE와 혼합된 Sendust 전파흡수체의 주파수를 함수로 하는 복소투자율

그림 3.2 (a) Silicon Rubber, (b) CPE를 지지재로 하는 각 시편의 복소투자율
 Fig. 3.2 Permeability as a function of frequency for samples mixed with
 (a) Silicone Rubber and (b) CPE.

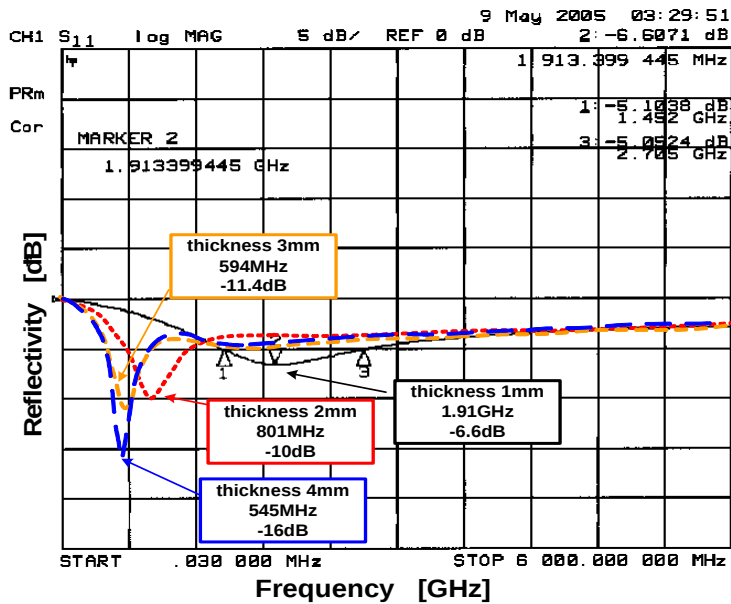
3.2 Sendust의 배합율에 따른 전파흡수능

본 실험에서는 초투자율이 30.000인 Sendust와 CPE(Chlorinated Poly-ethylene)의 혼합비를 각각 80 : 20 wt%, 85 : 15 wt%로 혼합하여 본 연구실에서 자체 제작한 Open Roller를 이용하여 두께 1mm, 2mm, 3mm 및 4mm의 Sheet형 전파흡수체를 제작하였다.

이 때 시편의 제작 온도는 70℃로 일정하게 유지되도록 하였다.



(a) Sendust : CPE = 80 : 20 wt%



(b) Sendust : CPE = 85 : 15 wt%

그림 3.3 Sendust의 배합율에 따른 주파수를 함수로 하는 반사계수

Fig. 3.3 Reflection coefficient as a function of frequency for samples with various Sendust ratio.

그림 3.3 은 지지재를 CPE(Chlorinated Poly-ethylene)로 고정하고 여기에 Sendust의 혼합비 Sendust : CPE = 80 : 20 wt%, Sendust : CPE = 85 : 15 wt%으로 혼합하여 두께가 1mm, 2mm, 3mm 및 4mm의 두께를 갖는 전파흡수체를 제작하여 이들의 전파흡수능을 측정한 그래프이다. (a)의 경우 시편의 두께가 1mm일 때 2.2 GHz에서 6.15 dB, 두께가 2mm일 때 1.29 GHz에서 9.93 dB의 우수한 전파흡수능을 나타내고 있으며 (b)의 경우 두께가 1mm일 때 1.91 GHz에서 6.6 dB, 두께가 2mm일 때 801 MHz에서 10 dB로 (a)의 경우보다 좀 더 우수한 전파흡수능을 보이고 있다. 또한 두께가 증가함에 따라 아래식에 나타난 대로 전형적인 전파흡수체의 특성을 나타내는 정합주파수는 저주파 쪽으로 이동하고 있음을 보이고 있다[9].

$$d = \frac{c}{2\pi\mu_r f}$$

여기서 d 는 시편의 두께, c 는 빛의 속도, f 는 주파수를 나타낸다.

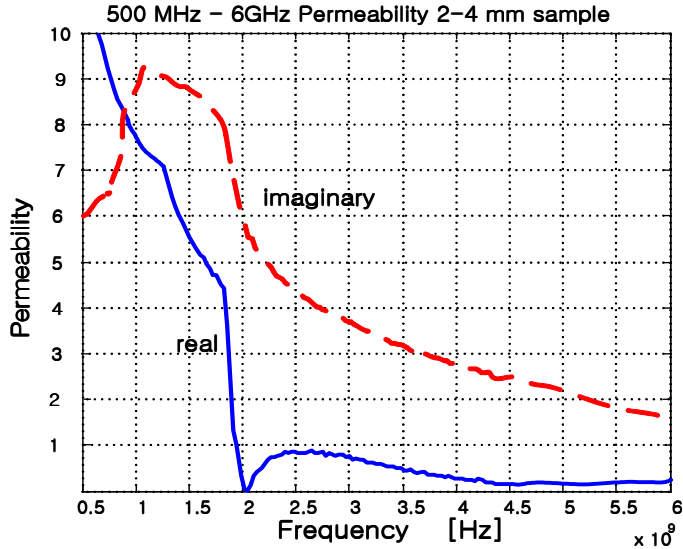


그림 3.4 Sendust 전파흡수체의 주파수를 함수로 하는 복소투자율

Fig. 3.4 Permeability as a function of frequency for samples.

자성손실재료로 하는 전파흡수체의 흡수능은 $\tan\delta = \mu''/\mu' > 1$ 일 때 즉 투자율의 허수부가 실수부보다 큰 영역에서 효과적인 흡수능을 나타낸다고 보고되고 있다.

따라서 그림 3.4는 이들 시편에 대해서 주파수를 함수로 하는 투자율을 조사한 그래프로써 두 시편 모두 $\tan\delta = 1$ 을 나타내는 주파수가 800 MHz 부근임을 볼 때 본 연구에서 제작한 시편 모두 이 사실과 일치하고 있음을 알 수 있다.

3.2.1 시편 두께가 1mm 이하 일 때의 전파흡수능

그림 3.5는 가장 우수한 전파흡수능을 보이는 혼합비 Sendust : CPE = 85 : 15 wt% 일 때 시편의 두께가 0.85mm, 0.5mm, 0.35mm인 경우의 전파흡수능을 나타낸 그래프이다. 시편 두께가 0.5mm에서는 PCS의 사용주파수인 1.8 GHz에서 3.17 dB, 특히 0.85mm에서는 5.56 dB로 본 논문에서 제안하는 목표와 일치하는 우수한 전파흡수능을 보이고 있으며 두께가 증가함에 따라 정합주파수가 저주파대로 이동하며 이러한 특성은 일반적인 전파흡수특성과 일치함을 알 수 있다. 또한 전파흡수능은 이미 보고 된 바와 같이 전파흡수체의 두께에 따라 변화함을 본 연구에서도 확인 할 수 있었다[10].

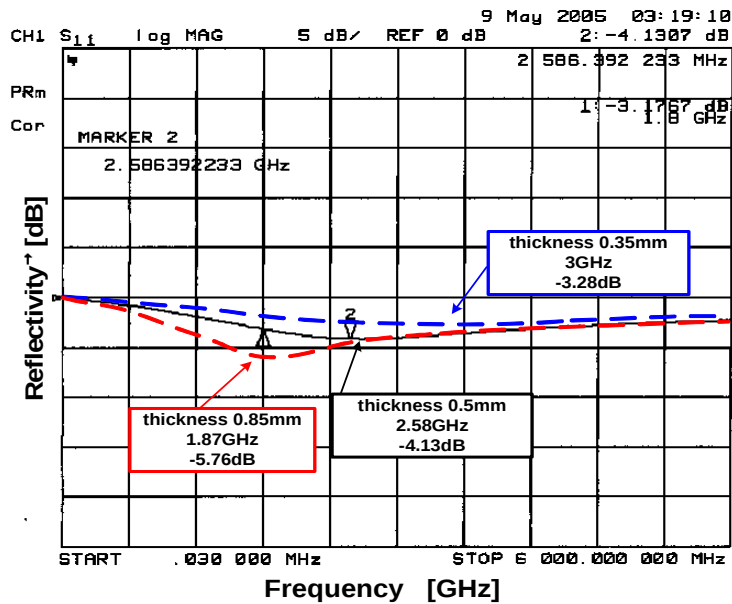


그림 3.5 시편 두께에 따른 주파수를 함수로 하는 반사계수

Sendust : CPE = 85 : 15 wt%

Fig. 3.5 Reflection coefficient as a function of frequency for the samples with various sample thickness.

3.3 $Al(OH)_3$ coating 양에 따른 전파흡수능

3.3.1 전파흡수체의 설계 및 제작

본 실험은 초투자율이 30.000인 Sendust에 비저항이 큰 $Al(OH)_3$ 를 coating함으로써 전파흡수 대역폭의 증가를 모색하였다. 일반적으로 coating은 전파흡수능의 협대역을 광대역화 시키는 중요한 공정으로 알려져 있다. $Al(OH)_3$ 가 각각 함유된 Sendust를 지지재인 CPE에 분산시켜 본 연구실에서 자체 제작한 Open Roller를 이용하여 시편 두께가 1mm, 2mm의 Sheet형 전파흡수체를 제작, 그 반사계수를 측정하였다. 이때 시편의 제작 온도는 70℃로 일정하게 유지되도록 하였다.

그림 3.6은 $Al(OH)_3$ 가 coating된 Sendust 전파흡수체의 제작 공정을 나타낸 그림이다. 일반적으로 코팅은 1100℃ 이상의 고온처리에서 행해지지만 본 연구에서는 CMC와 H_2O 를 혼합비 CMC : H_2O = 97 : 3 wt%로 일정하게 혼합하여 CMC 수용액을 만든 후, 이를 double screw mill을 이용하여 Sendust와 $Al(OH)_3$ 의 코팅하는 새로운 코팅법을 제시하였으며 이를 그림 3.10에 나타낸 바와 같이 SEM을 이용하여 코팅을 확인하였다.

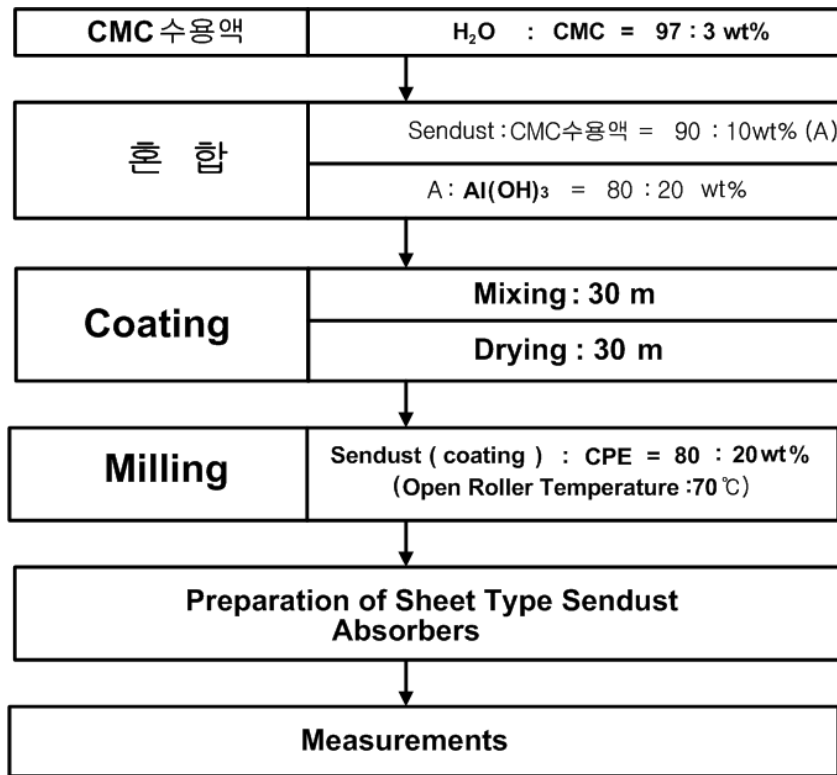


그림 3.6 Sendust 전파흡수체의 제작 공정

Fig. 3.6 Preparation of Sendust absorber.

3.3.2 전파흡수능 평가 및 분석

(1) 전파흡수능

본 실험에서는 전파흡수능 대역폭의 광대역을 가지는 전파흡수체를 개발하기 위해 $Al(OH)_3$ 의 첨가량을 변화시켜 시편을 제작하여 그 특성을 조사하였다.

그림 3.7과 그림 3.8은 $Al(OH)_3$ 를 각각 10 wt%, 15 wt%, 20 wt%로 변화시키면서 제작한 시편 두께의 2mm, 3mm의 전파흡수체에 대한 주파수 변화에 따른 흡수능을 나타낸 그림이다.

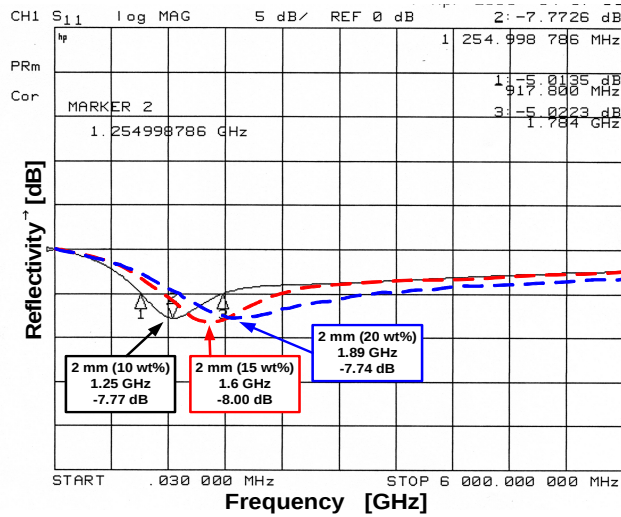


그림 3.7 $Al(OH)_3$ 변화량에 따른 반사계수(시편 두께 2mm)

Fig. 3.7 Reflection coefficient as a function of frequency for samples of 2mm with various $Al(OH)_3$ content.

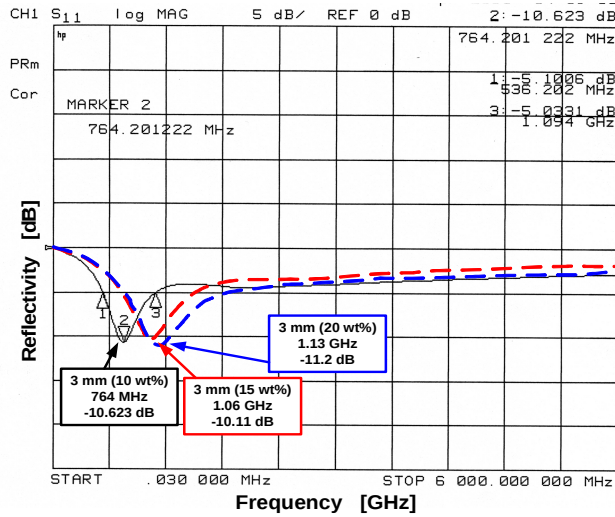
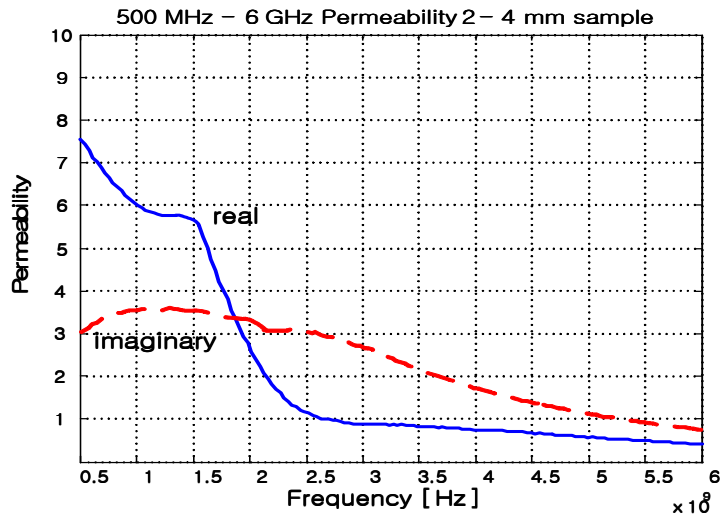


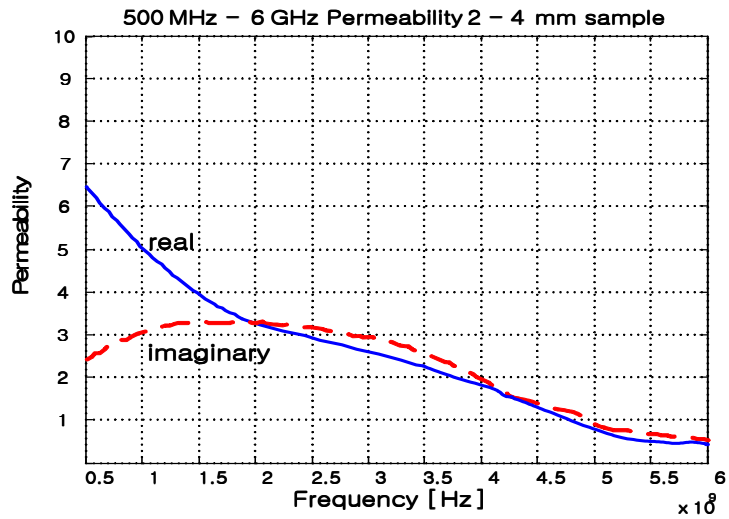
그림 3.8 $Al(OH)_3$ 변화량에 따른 반사계수 (시편 두께 3mm)

Fig. 3.8 Reflection coefficient as a function of frequency for samples of 3mm with various $Al(OH)_3$ content.

(2) 복소 투자율



(a) $Al(OH)_3$ 10 wt%



(b) $Al(OH)_3$ 20 wt%

그림 3.9 $Al(OH)_3$ (a) 10 wt% (b) 20 wt%에 대한 주파수를 함수로 하는 복소투자율

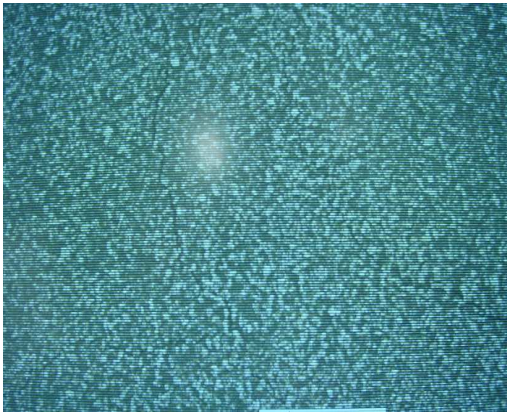
Fig. 3.9 Permeability as a function of frequency for samples with various $Al(OH)_3$ content.

그림에서 알 수 있듯이 각각의 두께가 다른 시편에 $Al(OH)_3$ 첨가는 전파 흡수능 및 대역폭 향상에 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다. 이는 Sendust에 $Al(OH)_3$ 를 첨가함으로써 자성재료 입자간의 강자성을 완화시키고 비저항의 증가로 인한 손실의 증가에 따른 것으로 판단된다. 따라서 $Al(OH)_3$ 와 같이 비저항이 높은 물질을 Sendust에 코팅함으로써 정합주파수와 전파흡수능을 제어할 수 있음을 의미한다.

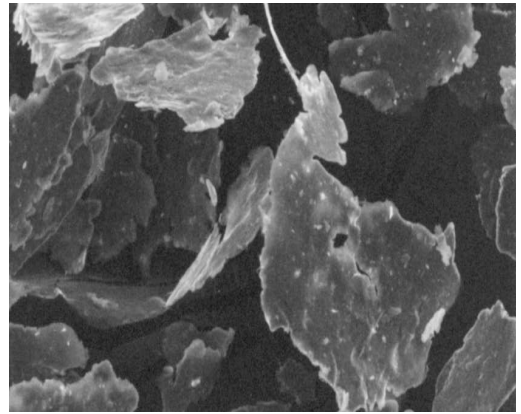
Ferrite를 자성손실재료 한 전파흡수체의 흡수능은 자기손실 $\tan\delta = (\mu''/\mu')$ 과 매우 밀접한 관계가 있으며 $\tan\delta > 1$ 일 때 우수한 흡수능을 나타낸다. 그림 3.7과 그림 3.8에서 알 수 있듯이 $\tan\delta > 1$ 을 나타내는 주파수가 1.5 GHz에서 2 GHz 부근임을 볼 때 본 실험에서 제작한 시편 모두 이 사실과 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 또한 그림 3.9의 (a), (b)는 복소투자율을 나타낸 그래프로 $\tan\delta > 1$ 을 나타내는 주파수가 각각 1.8 GHz, 2GHz로 $Al(OH)_3$ 의 coating양이 증가할수록 고주파로 이동함을 알 수 있다.

(3) SEM 분석

그림 3.10은 $Al(OH)_3$, Sendust 자체의 표면과 $Al(OH)_3$ 가 각각 10 wt%, 20 wt%로 함유된 Sendust의 표면을 전자현미경으로 500배 확대한 사진이다. SEM(Scanning Electron Micrograph) 분석을 통해 $Al(OH)_3$ 가 Sendust 표면에 코팅 되어 있음을 보이고 있다.



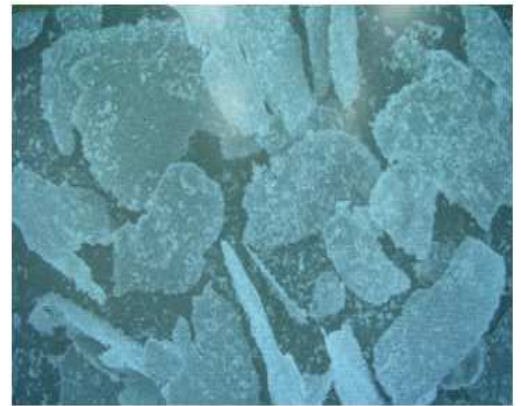
(a) $Al(OH)_3$



(b) Sendust



(c) 10 wt% ($Al(OH)_3$)



(d) 20 wt% ($Al(OH)_3$)

그림 3. 10 $Al(OH)_3$ 로 코팅된 Sendust의 표면 SEM사진
Fig.3.10 SEM micrographs of Sendusts coated with $Al(OH)_3$.

3.4 Sendust 분쇄시간에 따른 전파흡수능

본 실험은 분쇄시간에 따른 Sendust 입자크기의 제어를 통하여 전파흡수능의 향상과 흡수대역의 광대역을 모색하고자 한다. 그림 3.11에서는 분쇄시간에 따른 전파흡수능을 시편 두께가 2mm일 때의 반사계수 특성을 나타낸 것이다. 분쇄시간이 길어짐에 따라 정합주파수가 고주파대로 이동함을 알 수 있다.

이와 같은 사실로부터 동일한 두께를 갖는 전파흡수체에서 입자의 크기를 제어함에 따라 정합주파수를 제어할 수 있음을 알 수 있다[11].

그림 3.12에서 Sample A, Sample B, Sample C, Sample D는 분쇄 시간에 따른 Sendust의 입자 크기를 전자현미경으로 나타낸 것이다.

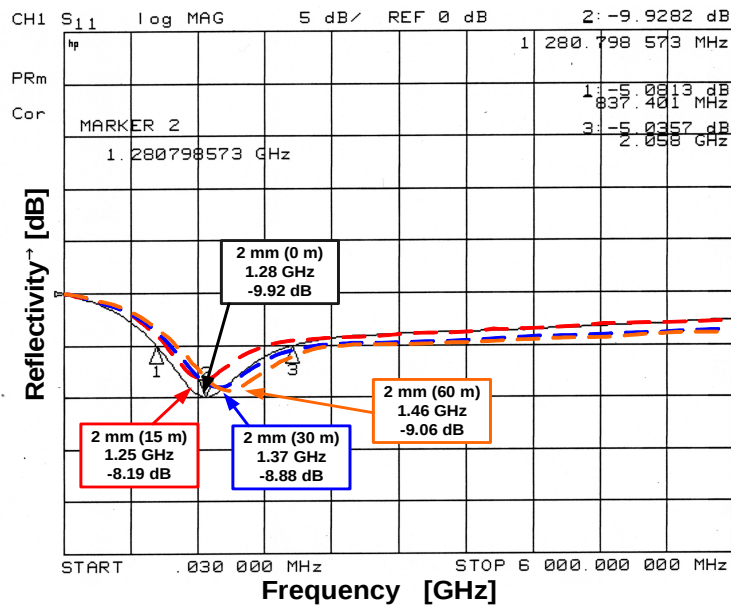
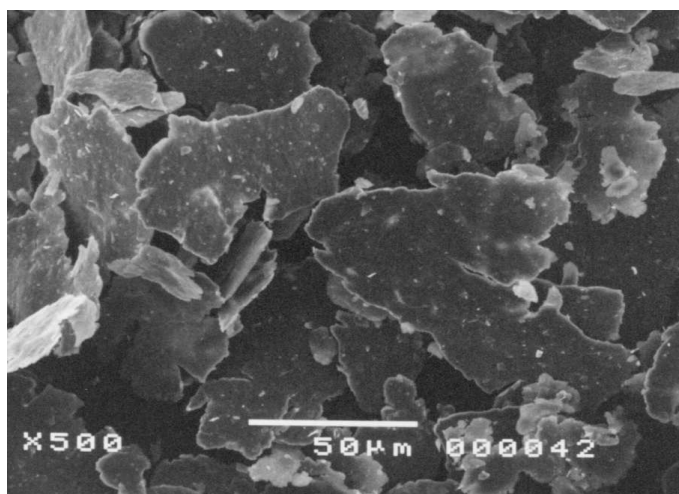
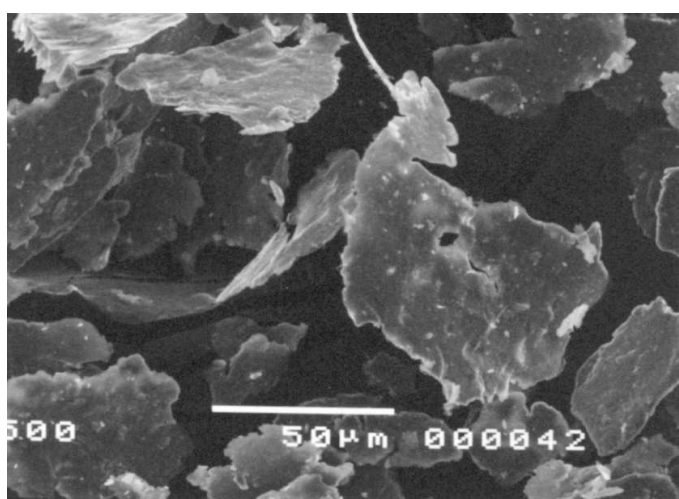


그림 3.11 분쇄시간에 따른 주파수를 함수로 하는 반사계수

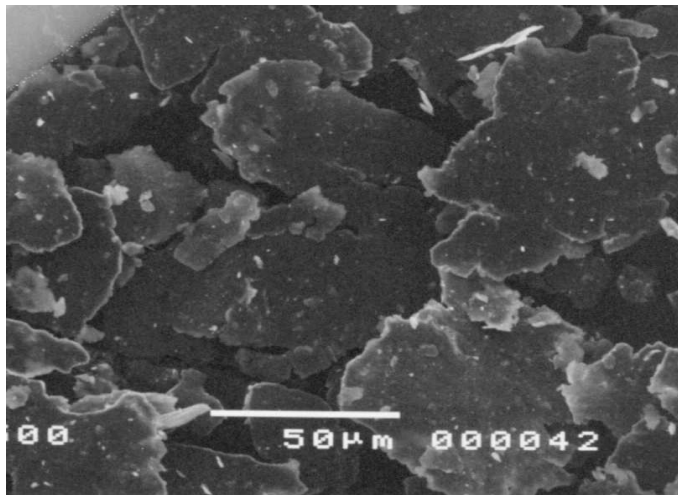
Fig.3.11 Reflection coefficient as a function of frequency for samples of 2mm with different milling time.



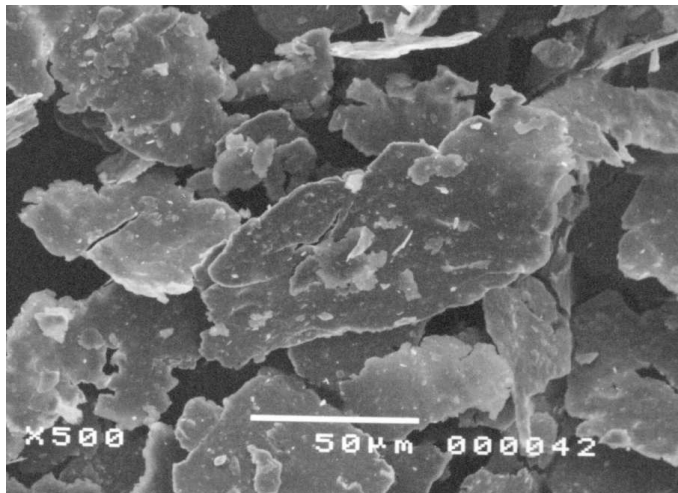
(a) Sample A (0분)



(b) Sample B (15분)



(c) Sample C (30분)



(d) Sample D (60분)

그림 3.12 분쇄된 Sendust의 표면 SEM 사진

Fig. 3.12 SEM micrographs for Sendust with different milling time.

3.5 Sendust 표면온도 변화에 따른 전파흡수능

3.5.1 전파흡수능 평가

본 실험은 Sendust : CPE= 85 : 15 wt%의 혼합비로 완성된 시편 두께가 3mm인 Sendust 전파흡수체를 Heating Molder를 이용하여 압력을 400kg/cm²로 일정하게 유지하되 표면 온도를 100℃, 150℃로 제어하면서 전파흡수능 향상과 대역폭의 광대역화를 모색하였다.

이는 기존의 전파흡수체 제작시 온도의 증가가 전파흡수능에 영향을 준다는 연구결과를 토대로 행하여 진 것이다[12].

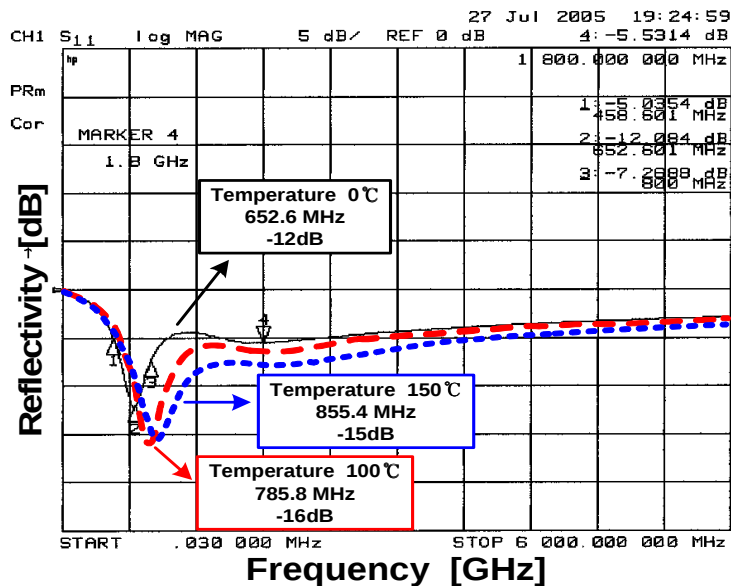


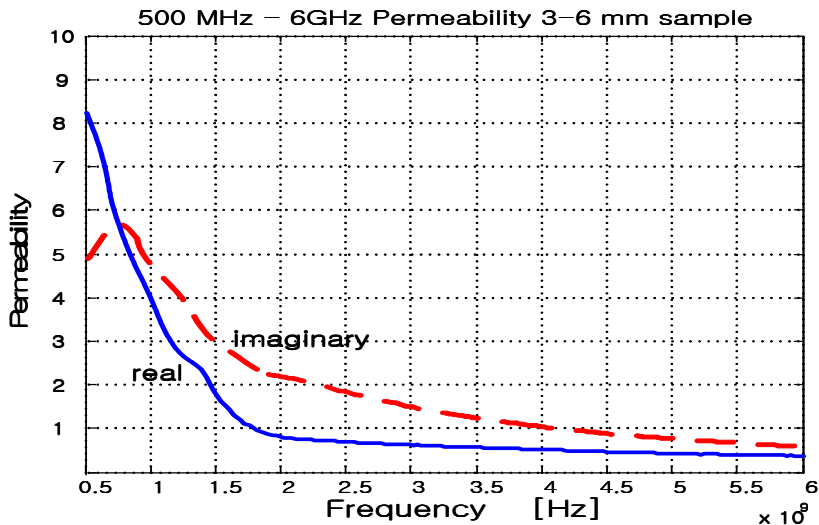
그림 3.13 Sendust 표면온도 변화에 따른 주파수를 함수로 하는 반사계수
(시편두께 3mm)

Fig. 3.13 Reflection coefficient as a function of frequency for samples of 3mm with different surface temperature.

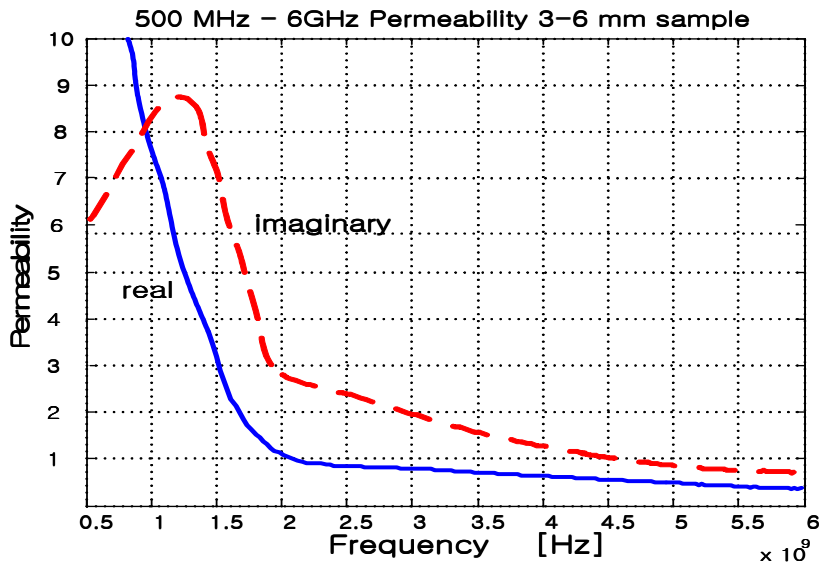
그림 3.13에서 알 수 있듯이 표면온도가 증가함에 따라 정합주파수가 고주파대로 이동하면 우수한 전파흡수능을 나타냄을 확인할 수 있고, 또한 흡수대역 역시 광대역화 됨을 확인할 수 있다. 이와 같은 사실로부터 동일한 두께를 갖는 완성된 전파흡수체에서 표면온도를 제어함 따라 정합주파수와 대역폭의 향상을 제어할 수 있음을 알 수 있다.

(2) 복소 투자율

그림 3.14는 복소 투자율을 나타낸 그래프로 일반적인 자성손실재료 한 전파흡수체의 흡수능은 자기손실 $\tan \delta > 1$ 일 때 우수한 전파흡수능을 나타낸다.



(a) 100 °C



(b) 150 °C

그림 3.14 표면온도 변화에 따른 주파수를 함수로 하는 반사계수
 Fig. 3.14 Permeability as a function of frequency for samples of 3 mm
 with various surface temperature.

그림 3.14의 (a), (b)에서 $\tan \delta > 1$ 을 나타내는 주파수는 각각 785 MHz, 855 MHz로 완성된 전파흡수체의 표면온도가 증가함에 따라 고주파로 이동함을 보이고 있고, 이는 본 실험에서 제작한 시편과 일치함을 잘 보여주고 있다.

제 4 장 결 론

본 논문은 전파흡수체를 개발하는데 있어 새로운 재료인 Sendust를 사용함으로써 새로운 전파흡수체 재료의 개발 가능성을 제시하였고, 이를 이용한 실용적인 면을 고려한 휴대전화 단말기용 전파흡수체 개발을 위한 기초연구이다.

초투자율인 30.000인 Sendust를 이용하여 지지재의 변화, 두께의 변화, $Al(OH)_3$ coating 변화량, 분쇄시간, 전파흡수체의 표면온도를 제어하며 시편의 전파흡수능, 대역폭 향상, 복소 투자율, SEM 등을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 대표적인 지지재로 사용되어 오던 Silicon Rubber와 CPE를 Sendust와

80 : 20 wt%로 일정하게 혼합한 후 그 특성 비교 분석하였다. CPE를 지지재로 한 전파흡수체가 저주파에서 우수한 특성을 나타냄을 알 수 있었고, $\tan\delta > 1$ 을 나타내는 주파수가 휴대전화기 중심사용 주파수 범위인 1.5 GHz에서 1.8 GHz 사이로 본 연구에서 제작한 시편 또한 이 사실과 일치함을 알 수 있었다.

(2) 초투자율이 30.000인 Sendust를 CPE와 가장 우수한 전파흡수능을 보이는

혼합비 85 : 15 wt%로 혼합을 해서 두께 변화에 따른 흡수능을 조사하였다. 그 결과 휴대전화기의 사용 주파수인 1.8 GHz에서 두께가 1mm이하인 0.85mm에서 5.76 dB의 가장 우수한 전파흡수능을 나타내었으며 이는 현재 까지 발표된 휴대전화용 전파흡수체중 가장 우수한 성능이다.

(3) $Al(OH)_3$ coating 함유량의 변화가 전파흡수능에 미치는 영향을 분석한

결과 $Al(OH)_3$ 를 각각 10 wt%, 15 wt%, 20 wt%로 함유량이 증가함에 따라 정합주파수는 고주파로 이동하고 대역폭이 향상됨을 알 수 있었다. 각각의 두께가 다른 시편에 $Al(OH)_3$ 첨가는 전파흡수능 및 대역폭에 큰 영향을 미치는 것을 확인 할 수 있었다. 이는 Sendust에 $Al(OH)_3$ 를 첨가함으로써 정합주파수와 전파흡수능을 제어할 수 있음을 의미한다. 제작된 전

파흡수체의 샘플 두께가 3mm이고 혼합된 $Al(OH)_3$ 의 중량비가 20 wt%일 때 정합주파수 1.13 GHz에서 약 11.2 dB의 가장 우수한 흡수능을 나타낸다.

- (4) 분쇄시간 및 완성된 전파흡수체의 표면온도가 제어에 전파흡수능과 대역폭의 향상에 미치는 영향을 조사하였다. 분쇄시간이 길어짐에 따라 정합주파수가 고주파대로 이동하면서 우수한 전파흡수능을 나타냄을 알 수 있었다. 하지만 기존의 분쇄시간에 따라 페라이트 입자의 평균크기가 감소하면서 높은 주파수쪽으로 이동하는 것과는 달리 크게 변하지 않은 모습을 SEM 분석을 통해 확인할 수 있었다. 일반적으로 시편 제작시 온도가 증가함에 따라 전파흡수능이 향상됨을 기존의 연구를 통해서 확인할 수 있었다. 이에 완성된 전파흡수체를 Heating Molder로 100℃, 150℃로 변화시키면서 전파흡수능과 대역폭 향상에 미치는 영향을 조사한 결과, 표면온도가 증가함에 따라 정합주파수가 고주파로 이동하면서 우수한 전파흡수능을 나타냄을 알 수 있었고 특히 대역폭이 크게 향상됨을 확인할 수 있었다. 이는 표면온도가 우수한 전파흡수체를 제작하기 위해 반드시 고려되어야 할 사항을 실험을 통해 알 수 있었다.

본 연구에서 개발한 Sheet형 전파흡수체는 실용성을 겸비한 고성능 전파흡수체로서 휴대전화 단말기로부터 누설되는 불요전자파를 흡수하기에 적합하므로 휴대전화 단말기에 실질적인 응용이 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] 김동일, 전상엽, “EMI/EMC 대책용 광대역화 전파흡수체의 개발에 관한 연구”, 한국향해학회지 제15권 제4호, pp. 13-35, 1991. 12.
- [2] 최형도, 채종석, 김덕원, 한용석, 이원재 “전자파 리스크 커뮤니케이션 환경분석 및 대국민 홍보 방안”, 제6회 전자기장의 생체 영향에 관한 워크숍. pp. 55, 2002. 10.
- [3] David M. Pozar, Microwave Engineering, Addison-Wesley, 1990
- [4] Dong Il Kim, Jae Young Bae, Jun Yong Son, Young Su Won and Jae Man Song, "A Study on Fabrication and Evaluation of Ferrite Wave Absorber", Journal of The Korean Electromagnetic Engineering Society, vol. 1 no. 1, pp.95-99, 2001.
- [5] 김동일, 안영섭, 정세모, “레이다용 광대역형 고성능 전파흡수체의 개발에 관한 연구”, 한국향해학회지, 제15권 제1호, pp.11-9, 1991.3.
- [6] 橋本修, “電波吸収体入門”, 森北出版社, p. 13, 1997.
- [7] 김동일, 안영섭, 정세모, “ 전파흡수체의 전파흡수특성 측정기법에 관한 연구”, 한국향해학회지, 제16권 제4호 pp. 25-34, 1992. 12.
- [8] Y. Hashimoto, "The application of ferrite as an absorber", Jap. J. Appl. Phys. vol. 6, no. 3, pp. 175-17, 1983.
- [9] Y. Naito, Electromagnetic Wave Absorber, Tokyo : New Ohm, 1987. 6.
- [10] 정태우, 이완재, “Cu-Ni-Zn 페라이트의 미세조직과 전자파 흡수 특성”, 한국재료학회지, vol. 5, 1995.
- [11] 김호철, 이병택, 정연춘, 엄진섭, “ MnZn계 페라이트-고무 복합체의 마이크로파대역에서의 전기적 특성 및 전자파 흡수 특성”, 전자파학회논문지, 제4권 2호, pp. 41-47, 1993. 6.
- [12] Dong Il Kim, Su Joung Kim and Jae Man Song, "Dependence of Preparation Temperature of the Microwave Absorber Preparation in Absorber for Mobile Phone", Journal of The Korea Physical Society, vol. 43, no. 2, pp. 269-272, 2003.

발 표 논 문

학술지 게재논문

- [1] 김동일, 최정현, 최동한, 송재만, 정재현, “옷을 지지재로 사용한 페인트형 MnZn와 NiZn 페라이트 전자파 흡수체 특성의 비교연구”, 한국해양대학교 해사산업연구소논문집, 제 15권, pp. 61-68, 2004. 9.
- [2] J. M. Song, D. I. Kim, S. H. Moom, S. J. Shin, J. H. Choi, J. H. Jeung, “Electromagnetic Wave Absorbers by using Alnico Magnets,” 한국해양대학교 산업기술연구소 연구논문집, Vol. 22, pp. 67-70, 2005. 01.
- [3] 송재만, 김동일, 문상현, 신승재, 최정현, 정재현, “경자성체를 이용한 전파흡수체의 개발”, 한국해양대학교 산업기술연구소 연구논문집, Vol. 22, pp. 71-75, 2005. 01.
- [4] Jae-Man Song, Dong Il Kim, Seung-Jae Shin, Sang-Hyun Moon, Jung-Hyun Choi, Jae-Hyun Jeung, “Microwave Absorbers Prepared with Alnico Magnets,” International Journal of Navigation and Port Research, Vol. 29, No. 2, pp. 147-150, 2005. 03.
- [5] 최정현, 김동일, 송재만, 정재현, “Sendust를 이용한 휴대전화용 전파흡수체의 개발”, 한국전자과학회지, 제 16권, 제 8호, pp. 842-847, 2005. 8.
- [6] Jae-Man Song, Dong Il Kim, Jeung-Hyun Choi, Jae-Hyun Jeung, “Electromagnetic Wave Absorbers Prepared with Alnico Magnets”, Journal of The Korea Electromagnetic Engineering Society, vol. 5, No. 3, pp. 117-121 SEP 2005.

국제 학술회의 발표논문

- [7] Jae Man Song, Dong Il Kim, Sang Hyun Moon, Seung Jae Shin, Jae Hyun Jeung, Jeung Hyun Choi, Ki Man Kim, "Study on Electromagnetic Wave Absorbers," 10th International Symposium on Microwave and Optical Technology(ISMOT-2005), Fukuoka, Japan, pp. 224, August 22-25, 2005.
- [8] Jae Hyun Jung, Dong Il Kim, Jung Hyun Choi, Dae Hun Kim, Sin Ja Jang, "The Latest Trends of EMC and EM wave Absorber Technologies," Korea-Japan joint Symposium for international Co-Research on Marine Technology Mokpo Korea pp. 29-32, 2005. 2. 25~27, February 25-27, 2005.

국내 학술회의 발표논문

- [9] 송재만, 김동일, 신승재, 문상현, 정재현, 김기만, "알니코를 이용한 전파흡수체의 개발에 관한 연구", 2004년도 제1회 산업 기술연구소 학술강연회 논문집, pp. 29-35, 2004. 8. 3.
- [10] 김동일, 최동한, 김기만, 정재현, 최정현, "옷을 지지재로 사용한 MnZn와 NiZn 페라이트 전자파 흡수체 특성의 비교연구", 2004년도 추계 마이크로파 및 전파학술대회 논문집, pp. 460-463, 2004. 9. 18.
- [11] 김대훈, 손준영, 김동일, 정재현, 최정현, "피라미드타입 흡수체를 페라이트 전파흡수체 위에 부착한 초광대역 전파흡수체의 설계", 2004년도 전파 및 광파기술 학술대회 논문집, Vol. 5, No. ,pp. 84-87, 2004. 10. 30.
- [12] 최정현, 김동일, 정재현, 송재만, 김기만, "페인트형 전파흡수체에 관한 연구", 2005년도 제 1회 산업 기술연구소 학술강연회 논문집, pp. 9-18, 2005. 3. 29.

- [13] 최동묵, 김동일, 정재현, “고온 초전도체 마이크로스트립 라인을 이용한 필터 설계”, 2005년도 제 1회 산업 기술연구소 학술강연회 논문집, pp. 49-53, 2005. 3. 29.
- [14] 정재현, 최정현, 김동일, 송재만, “Development of Electromagnetic Wave Absorbers with Alnico Magnets,” 2005년도 제1회 산업기술 연구소 학술 강연회 논문집, pp. 55-64, 2005. 3. 29.
- [15] 정재현, 김동일, 송재만, 최정현, “Sendust를 이용한 전파흡수체의 개발 ”2005년도 마이크로파 및 전파전파 학술대회 논문집, Vol. 28, No. 1, pp. 427-430, 2005. 5. 21.
- [16] 정재현, 김동일, 송재만, 최정현, “선박용 레이더의 허상 방지용 PAINT형 전파흡수체의 개발”, 2005년도 한국마린엔지니어링학회 전기학술대회논문집, pp. 350-355, 2005. 6. 23~25.
- [17] 최정현, 김동일, 송재만, 정재현, “Sendust를 이용한 휴대전화용 전파흡수체의 개발”, 2005년도 한국마린엔지니어링학회 전기학술대회논문집, pp.356-361, 2005. 6. 23~25.
- [18] 최정현, 김동일, 송재만, 정재현, “Paint형 전파흡수체의 개발”, 2005년도 추계 마이크로파 및 전파학술대회 논문집, Vol. 28, No. 2, pp. 317-320, 2005. 9. 24.

감사의 글

어느덧 2년이라는 시간이 흘러서 졸업을 앞둔 아직도 부족한 저의 모습을 보면서 감사의 글을 올리게 됩니다. 본 논문이 있기까지 시종일관 세심한 지도와 관심으로, 부족한 저를 이끌어 주신 지도교수 김동일 스승님께 마음깊이 감사를 드리며, 그리고 깊은 관심으로 논문심사를 맡아주신 민경식 교수님과 윤 영 교수님께 감사를 드립니다. 아울러 조형래 교수님, 김기만 교수님, 정지원 교수님께도 감사를 드립니다. 부족한 저에게 좋은 말을 아끼지 않으셨던 PSB 원영수 국장님과 KBS 박우근 부장님 그리고 산업기술연구소 송재만 박사님께 진심으로 감사의 마음을 전합니다. 너무나도 낯설었던 마이크로파 연구실 하지만 2년 동안 동고동락하면서 많은 것을 가르쳐줬던 준영이형과 동한이형, 창묵이형, 그리고 항상 따뜻한 커피한잔으로 대학원 생활이 힘들 때 위로를 해줬던 이동통신 연구실에 동식이형에게도 감사의 마음을 전합니다. 또한 같이 생활한지는 얼마 되지 않았지만, 많은 것을 가르쳐주고 있는 도연이형과 언제나 묵묵히 자기 맡은 일에 충실한 루이에게도 고마운 마음을 전합니다. 처음 여기에 와서 열심히 하자고 의욕을 불태웠던 내 동기 정현이와 대훈이 아울러 이제 연구실을 이끌어 가게 될 윤석이와 승훈이 재현이에게도 고마운 마음을 전하며, 언제나 시끄러운 하지만 연구실에 없어서는 안 될 상미 등 마이크로파 연구실 모든 식구들의 앞날에 무궁한 발전을 기원합니다.

공부를 한다 라는 핑계로 2년 동안 제대로 술 한잔 못했지만 언제나 뒤에서 힘이 되어준 우리 지기회 친구들과 동의대학교 전자공학과 친구들과 그리고 고등학교 친구들, 초등학교 친구들에게도 고마운 마음을 전합니다.

마지막으로 무엇보다 제가 여기까지 오는데 묵묵히 뒷바라지 해주시고 항상 힘이 되어주신 사랑하는 부모님 그리고 대학원 생활하는 동안 언제나 파이팅 해 준 동생들과 이 기쁨을 나누고 싶습니다.

2006년 2월

정 재 현