工學博士 學位論文

漆을 支持材로 使用한 多層形 電波吸收体에 關한 研究

A Study on Multi-Layer Electromagnetic Wave Absorber Using Natural Lacquer as a Binder

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

崔東漢

本 論文을 崔東漢의 工學博士 學位論文으로 認准함

委員	員長:工 學 博 士	鄭世謨	(印)
委	員:工 學 博 士	安榮燮	(印)
委	員:行政學博士	金基文	(印)
委	員:工 學 博 士	金珉奭	(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

崔東漢

本 論文을 崔東漢의 工學博士

學位論文으로 認准함

委員	長	•	T	學	博	土	鄭	世	謨	(印)
委	員	-	T	學	博	<u>+</u> :	安	榮	燮	(印)
委	員	-	行	政學	博		金	基	文	(印)
委	員	•	工	學	博	<u>+</u>	金	珉	奭	(日)
委	員	•	T	學	博	土	金	東		(印)

2006年 2月

韓國海洋大學校 大學院 電波工學科

崔東漢

iii

<< 목 차 >>

No	menclature
Ab	obreviations
Ab	ostract
제	1 장 서론 ··································
	1.1 연구 배경
	1.2 연구 목적 ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~
	1.3 연구 방법
제	2 장 전파흡수체의 기본이론
	2.1 전파흡수체의 의의
	2.2 전파흡수체의 원리
	2.2.1 평면파와 흡수원리6
	2.2 에너지의 흡수9
	2.3 전파흡수체의 분류
	2.3.1 전파흡수 재료에 의한 분류
	2.3.2 층수에 의한 분류
	2.3.4 용도에 의한 분류
	2.3.5 주파수 특성에 의한 분류
	2.4 정합조건
	2.4.1 단층형 전파흡수체
	2.4.2 다층형 전파흡수체
	2.4.3 광대역형 전파흡수체
제	3 장 전파흡수체 설계 이론 및 측정법
	3.1 전파흡수체의 분포정수회로화
	3.1.1 파동방정식(Helmholtz Equation)
	3.1.2 분포정수회로화
	3.2 전파흡수체 재료와 측정

3.2.1	손실재	昱	 38
3.2.2	재료의	측정법	 47

제	4 장 전파흡수체 제작 및 재료정수 측정
	4.1 옻에 대한 특성분석
	4.1.1 옻의 특징
	4.1.2 옻의 약리작용
	4.1.3 옻의 구성성분
	4.2 샘플의 제작환경 및 조성비
	4.2.1 샘플의 제작환경
	4.2.2 시료의 조성비
	4.3 옻의 흡수능
	4.4 재료정수 측정
	4.4.1 사용된 Sample 및 Sample Holder63
	4.4.2 재료정수 계산방법65
	4.4.3 샘플의 조성비에 따른 재료정수67
제	5 장 시뮬레이션 및 측정 결과
제	5 장 시뮬레이션 및 측정 결과
제	5 장 시뮬레이션 및 측정 결과
제	5 장 시뮬레이션 및 측정 결과
제	5 장 시뮬레이션 및 측정 결과
제	5 장 시뮬레이션 및 측정 결과 79 5.1 단층일 경우 80 5.1.1 시뮬레이션 결과 80 5.1.2 실측정 결과 85 5.1.3 시뮬레이션 값과 실측치 비교 89 5.2 다층일 경우 94
제	5 장 시뮬레이션 및 측정 결과 79 5.1 단층일 경우 80 5.1.1 시뮬레이션 결과 80 5.1.2 실측정 결과 85 5.1.3 시뮬레이션 값과 실측치 비교 89 5.2 다층일 경우 94 5.2.1 시뮬레이션 결과 95
제	5 장 시뮬레이션 및 측정 결과 79 5.1 단층일 경우 80 5.1.1 시뮬레이션 결과 80 5.1.2 실측정 결과 85 5.1.3 시뮬레이션 값과 실측치 비교 89 5.2 다층일 경우 94 5.2.1 시뮬레이션 결과 95 5.2.2 실측정 결과 98
ম	5 장 시뮬레이션 및 측정 결과 79 5.1 단층일 경우 80 5.1.1 시뮬레이션 결과 80 5.1.2 실측정 결과 85 5.1.3 시뮬레이션 값과 실측치 비교 89 5.2 다층일 경우 94 5.2.1 시뮬레이션 결과 95 5.2.2 실측정 결과 95 5.2.3 시뮬레이션 값과 실측치 비교 98 5.2.3 시뮬레이션 값과 실측치 비교 99
ম	5 장 시뮬레이션 및 측정 결과 79 5.1 단층일 경우 80 5.1.1 시뮬레이션 결과 80 5.1.2 실측정 결과 85 5.1.3 시뮬레이션 값과 실측치 비교 89 5.2 다층일 경우 94 5.2.1 시뮬레이션 결과 95 5.2.2 실측정 결과 98 5.2.3 시뮬레이션 값과 실측치 비교 98 5.2.3 시뮬레이션 값과 실측치 비교 99
제 제	5 장 시뮬레이션 및 측정 결과 79 5.1 단층일 경우 80 5.1.1 시뮬레이션 결과 80 5.1.2 실측정 결과 80 5.1.3 시뮬레이션 값과 실측치 비교 89 5.2 다층일 경우 94 5.2.1 시뮬레이션 결과 95 5.2.2 실측정 결과 98 5.2.3 시뮬레이션 값과 실측치 비교 99 6 장 결론 102

Nomenclature

- **B** : Magnetic flux density vector
- C : Capacitance per unit length
- D : Electric flux density vector
- d_n : Thickness of n_th layer
- E : Electric field vector
- G : Conductance per unit length
- H : Magnetic field vector
- I : Current
- 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
- 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_0 : Permittivity of vacuum
- $arepsilon_{eq}$: Equivalent permittivity
- ε_{rn} : Relative permittivity of n_th layer
- λ : Wave length of free space
- μ : Permeability
- μ_0 : Permeability of vacuum
- μ_{eq} : Equivalent permeability
- 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
EMC	:	Electromagnetic Compatibility
EMI	:	Electromagnetic Interference
EMS	:	Electromagnetic Susceptibility
FCC	:	Federal Communications Commission
IEC	:	International Electromagnetic Commission
TEM	:	Transverse Electro Magnetic
TE	:	Transverse Electric
TM	:	Transverse Magnetic
MW	:	Molecular Weight

Abstract

A Study on Multi-Layer Electromagnetic Wave Absorber using Natural Lacquer as a Binder

Dong Han Choi

Dept. of Radio Sciences & Engineering Graduate School, Korea Maritime Univ. Supervisor : Prof. Dong Il Kim, Ph. D

With the progress of electronics industry and radio communication technology, human being might enjoy its abundant life. On the other hand, serious social problems such as electromagnetic interference (EMI), have been arisen due to the increased use of electromagnetic (EM) waves. Therefore, International organizations such as CISPR, FCC. ANSI. have provided the standards for the EM wave environments and for countermeasure of the electromagnetic compatibility (EMC).

Generally, a silicone rubber and a chlorinated polyethylene(CPE) have been used as a binder for high-performance composite EM wave absorbers.

In this dissertation, the EM wave absorption performance of natural lacquer which is newly proposed as a binder was investigated. MnZn ferrite EM wave absorbers mixed with natural lacquer were prepared and their absorption ability was also investigated.

vi

The EM wave absorbers are fabricated in different proportions of MnZn, or NiZn ferrite and natural lacquer, and their reflection coefficients are measured. The permittivity and permeability are calculated by using the measured reflection coefficients. The EM wave absorption abilities are calculated according to different thicknesses of the EM wave absorbers, and then multi-layer type EM wave absorbers with broad bandwidth are calculated and fabricated in accordance with different layer-sequence. The measured results are analyzed by comparing with the calculated ones.

As a result, the prepared MnZn ferrite EM wave absorbers which are mixed with natural lacquer showed excellent EM wave absorption characteristics compared with MnZn ferrite EM wave absorbers which are mixed with the conventional binders, such as a silicone rubber and a chlorinated polyethylene(CPE). The measured results of the single-layered type EM wave absorbers are a function of thickness agree well with the simulated ones.

In addition, the measured results of the two-layered EM wave absorbers composed of MnZn Ferrite and NiZn Ferrite and fabricated with natural lacquer binders are similar with the simulated ones. Thus, it was shown that the multi-layered EM wave absorbers have more broadband characteristics than the single-layered ones.

vii

제 1 장 서론

1.1 연구 배경

최근의 전자통신기술의 발달은 인류의 일상생활 편리함에 지대한 공헌을 한 것은 사실이나 한편으로는 엄청나게 늘어난 주파수의 수요로 인하여 불필요한 전자파에 대한 폐해로 나타나게 되었다. 최근의 정보통신과 관련된 장비들이 초소형화, 경량화, 자동화로 발전하면서 장비 사용이 급증하여, 장비들 간에 서 로 불필요한 전자파를 방사함으로써 불요전자파에 의해 각종 산업 현장에서의 생산 설비나 은행의 컴퓨터 단말기의 오동작, 교통수단 및 핵발전소의 제어 장 치의 오동작 등과 같은 전자파장해문제와 기기 오동작으로 인한 인명에 치명적 인 피해를 끼친 사례들이 보고되고 있으며 갈수록 증가해 가는 추세이다. 이러 한 이유로 인해 전자파 장해에 대한 대책이 사회적으로 큰 관심을 끌고 있다.

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

이러한 전자파장해에 대한 대책을 수립하기 위해서는 불요전자파의 방사를 억제하기 위한 EMI 제어 및 EMI 측정이 필수적이며 EMC (Electromagnetic Compatibility) 분야에서는 전자파환경의 정량화, 전자계분포의 측정 및 전자펄 스의 측정 등이 필요하다[2],[3].

전파흡수체의 연구를 역사적으로 살펴보면 다음과 같이 구별할 수 있다. 제 1세대는 주로 전쟁 중에 행해졌기 때문에 레이더 전파를 흡수하는 것을 목적으 로 하고 있으며, 제 2세대는 안테나를 중심으로 하는 전파소자의 특성을 측정 하는 전파암실을 만들기 위해 필요한 전파흡수체의 개발을 목적으로 하였다. 제 3세대는 전자기기로부터의 누설전파 규제를 만족하는 제품의 검사 또는 내 성(Immunity)의 측정을 위한 전파암실을 만들기 위한 전파흡수체의 개발을 목 적으로 하고 있다. 제 1세대의 흐름은 현재에도 TV전파의 불요반사파 흡수로 서 계속되고 있다. 제 2세대의 특징은 주파수가 마이크로파대이고 제 3세대인 현재는 하한주파수가 30 MHz인 저주파로 하는 것이 특징이다. 즉, CISPER의 Pub.22에 의하여 30 MHz에서 1000 MHz의 주파수 범위에서 전자기기로부터의 누설전파의 규제가 정해져 있고, 이것을 측정하는 전파암실을 구축하기 위해서 는 이 주파수에 대해서 충분한 반사감쇠량을 갖는 전파흡수체를 개발할 필요가 있다. 특히, 금후 30 MHz 이상의 모든 주파수대역을 덮는(Cover) 두께가 얇은 전파흡수체의 개발연구가 필요하고 이것을 제 4세대라 부를 수 있을 것이다[4].

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

따라서 보다 저렴한 전파흡수체 특성측정기법에 대한 연구가 현재 진행되고 있고, 전파무향실의 특성평가 역시 더욱 정밀한 결과가 예상되고 있다. 자성재 료인 페라이트를 이용한 전파흡수체는 우수한 흡수특성으로 인하여 타일형과 그리드형의 이면에 금속판을 부착한 형태로 Naito에 의하여 개발되었다[8].

전자·정보통신기술의 발전과 더불어 사용하는 주파수는 점점 더 늘어나고 전파사용 또한 늘어나고 있으며 전파의 사용이 늘어나면 늘어날수록 우리가 원 하지 않는 불요전자파 또한 늘어 날 것이다. 그러므로 높은 주파수대의 전파흡 수체 개발과 광대역화가 절실히 요구되고 있다. 전파흡수체를 원하는 형태로 유지 시키고 정합주파수를 제어하기 위해서 지 지재(Binder)를 사용하고 광대역화를 위해서 전파흡수체를 다층으로 제작해오 고 있다.

본 논문에서는 전파흡수체의 새로운 지지재로 한국전통공예의 유약으로 사용되어오던 옻(漆)을 새롭게 제안하였다. 기존의 지지재와 비교해서 옻을 지지 재로 사용한 전파흡수체가 더 우수함을 확인하였다. 옻은 MnZn Ferrite, NiZn Ferrite와 다양한 조성비로 혼합하여 전파흡수체를 제작하였다. 옻을 혼합한 페라이트(Ferrite) 전파흡수체의 조성비에 따라 각각의 재료정수(유전율 : ϵ_r , 투자 율 : μ_r)를 구한 다음 이것을 입력으로 두께에 따라서 흡수능이 어떻게 변화하는가를 시뮬레이션(Simulation)한 후 실제측정치와 비교 하였다. 다음으로 전파 흡수체의 광대역화를 위해서 두께별 적층 순서별로 흡수대역폭이 어떻게 변화하는지 시뮬레이션하고 최적두께를 구한 후 두께 및 적층순서에 따라 전파흡수 체를 제작하여 실제 흡수능을 측정하여 측정치와 시뮬레이션치를 비교하였다.

1.2 연구 목적

기존의 Sheet형 전파흡수체나 타일형 페라이트 전파흡수체는 흡수 주파수대 가 좁아서 Sheet형의 경우에는 원하는 주파수와 흡수능에 맞게 전파흡수체를 제작하기 위해서 지지재와의 혼합비율을 조정하거나 두께를 변화시켜서 제작하 였다. 또 전파흡수재료와 지지재 이외에 다른 물질들을 첨가해서 제작해 왔을 뿐만 아니라 제작 과정에서의 여러 가지 환경적 요인들이나 재료의 입자크기 등 다양한 제어 요인들 때문에 한 번에 원하는 전파흡수체를 제작하기란 정말 어려운 실정이다.

그래서 원하는 주파수대에서 원하는 흡수능을 가지는 전파흡수체를 보다 쉽 고 빠르게 찾아내기 위해서 전파흡수체의 제어 요인 중 하나인 두께에 따라서 흡수능이 어떻게 변하는지를 흡수체의 재료정수(유전율 : ε_r, 투자율 : μ_r)를 가 지고 시뮬레이션을 하여 최적의 두께를 구하였다. 전파흡수체의 흡수능의 광대 역화를 위해 각 종류가 다른 전파흡수체에 대하여 다층형(Multi -Layer Type) 전파흡수체를 제작할 때 금속판을 기준으로 어떤 전파흡수체를 먼저 적층을 할 것인지 또 각 전파흡수체의 두께는 얼마로 해야 보다 더 광대역 전파흡수체를 제작할 수 있는지를 시뮬레이션하고 시뮬레이션 결과에 따라 전파흡수체를 제 작하여 실측치와 계산치를 비교함으로써 본 연구의 타당성을 입증하고자 하였 다.

1.3 연구 방법

페라이트 전파흡수체의 경우에는 전파흡수체의 개발과 더불어 전파흡수체의 흡수능 측정방법도 지속적으로 발전되어 왔으나 광대역화를 위해서 기하하적인 구조를 갖는 십자돌기형 페라이트 전파흡수체나, 원추절단형 페라이트 전파흡 수체의 경우에는 그 형상 때문에 제작상의 비용과 어려움이 있고 측정 또한 실 험적으로 간단히 전파흡수능 또는 재료정수 등을 측정하기는 어려운 실정이어 다[9]-[11]. 따라서 본 연구에서는 비교적 제작이 용이하고 비용이 값싼 Sheet 형과 타일형 페라이트 전파흡수체를 광대역화 하기 위해서 여러 층으로 적층하 는 다층형 페라이트 전파흡수체를 제작하고자 할 때 보다 쉽고 빠르게 제작하 기 위해서 다음과 같은 순서로 행하였다.

먼저 기존의 지지재로 사용되어 온 CPE(chlorinated polyethylene)와 실리 콘 고무(Silicone Rubber) 그리고 본 연구에서 지지재로 새롭게 제안하는 옻의 전파흡수능을 비교하였다. 다음으로 기존의 지지재(CPE, 실리콘 고무)와 옻을 혼합한 페라이트 전파흡수체를 제작하여 전파흡수능을 비교하였다. 옻을 지지 재로 사용한 전파흡수체를 5 가지 조성비에 따라 전파흡수체를 제작하였다.

제작된 페라이트 전파흡수체들의 두께가 ℓ일 때와 2ℓ일 때의 반사계수를 측정하여 길이l의 변화에 의한 측정법을 이용하여 MatLab으로 재료정수(ε_r, μ_r)를 계산한 다음 계산된 ε_r, μ_r을 이용하여 페라이트 전파흡수체의 두께에 따 른 흡수능을 시뮬레이션 하였다. 또 구해진 결과에 의해 다층형 전파흡수체를 구성할 때 적층의 순서를 정한 다음 다시 ε_r, μ_r 과 적층의 순서, 그리고 두께 를 입력하여 시뮬레이션하고 시뮬레이션 결과에 따라 본 연구에서 새롭게 제안 한 옻을 지지재로하여 적층의 순서에 따라 다층형 광대역 전파흡수체를 제작하 여 계산치와 실측시를 비교분석 하였다.

제 2 장 전파흡수체의 기본이론

2.1 전파흡수체의 의의

전파흡수체란 전자파의 반사를 저감하기 위한 것으로서, 당초에는 적의 레이 다에 잠수함이나 비행기가 탐지되지 않도록 하는 등의 군사 장비면에서의 요구 나 전파암실을 구축하기 위해 이용하는 것이 주된 사용 목적이었다. 그러나 근 래에 들어서는 전자렌지(microwave oven)나 컴퓨터 등과 같이 우리의 주변에 서 전자파가 많이 발생되고 있으며, 이들 전자기기에서 방사되는 불요 전파가 다른 전자기기에 악영향을 주고 있다. 이와 같이 전파환경이 갈수록 악화되어 가는 상황 하에서는 여기에 대처할 수 있는 각종 전파흡수체에 대한 개발의 필 요성이 더욱 증가되고 있다. 특히, 최근 전자파가 인체에 미치는 영향에 대한 관심이 고조되면서 전자파방해 대책용으로서의 전파흡수체의 이용은 점점 활발 해지고 있다[12].

전파 흡수체는 이와 같이 다양한 분야에서 널리 이용되며, 이러한 전파흡수 체는 그 사용목적에 어울리는 여러 가지 형상이나 구성으로 이루어지지만, 크 게 분류하면 야외에 사용하는 박형 전파흡수체, 전파암실 내에 사용하는 피라 미드나 웻지(wedge) 형상 등의 다층형 전파흡수체, 또한 간이 용도의 도료형 전파흡수체 등 각양각색의 것이 실용화되어 있다[12].

2.2 전파흡수체의 원리

2.2.1 평면파와 흡수원리

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

(1) 평면파



그림 2.1 평면파와 등위상면 Fig. 2.1 Plane wave and in-phase plane

그림 2.1에 나타내는 바와 같이 전파원으로부터 공간에 방사된 전자파는 공 간을 전파함에 따라, 위상면이 직선상인 평면파로 된다. 여기서는, z축 방향으 로 전파하는 평면파에 관해서, 다음의 맥스웰방정식으로부터 그 전자계를 검토 해 보자.

$$\nabla \times E = -\mu_0 \frac{\partial H}{\partial t} \tag{2.1}$$

$$\nabla \times H = \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \tag{2.2}$$

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

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

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

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

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

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

$$\frac{\partial H_x}{\partial z} = \varepsilon_0 \frac{\partial E_y}{\partial t} \tag{2.6}$$

여기서, ϵ_0 와 μ_0 는 각각 자유공간의 유전율과 투자율이다.

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

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

여기서, 가령 E_y 에 관한 파동방정식 (2.7)의 해를 구하면 전계 E_y 가 구해진다. 즉, 시간인자를 $e^{j\omega t}$ 라 하고, 이것을 식 (2.7)에 대입하면 E_y 에 관해 2계의 선형 미분방정식을 얻는다. 이 해는 다음과 같이 진행파 $E_+e^{-\gamma_0 z}$ 와 후진파 $E_-e^{\gamma_0 z}$ 의 선형결합으로서 나타낼 수 있지만, 여기에는 그림 2.2(a)와 같이 +z 방향으로 전파하는 파를 고려하고 있기 때문에, 진행파($E_+e^{-\gamma_0 z}$)만을 선택한다. 또, $\gamma_0 = j\omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$ 라 놓으면

$$E_{y} = (E_{+}e^{-\gamma_{0}z} + E_{-}e^{\gamma_{0}z})e^{j\omega t}$$
(2.8)

이 된다. 이 E_{y} 성분을 식 (2.3)에 대입하면 H_{x} 성분도 다음과 같이 도출될 수 있다.

$$H_{x} = -\frac{\gamma_{0}}{j\mu_{0}\omega}E_{+}e^{-\gamma_{0}z}e^{j\omega t} = -H_{+}e^{-\gamma_{0}z}e^{j\omega t}$$
(2.9)

더욱이, 이러한 평면파의 전계성분과 자계성분에 관해서, 그 방향도 고려하여 비를 구하면 일정한 값이 된다. 자유공간에서 이 값은 약 375.7 요이 되고, 파 동임피던스라 불리워진다.

$$Z_0 = \frac{E_y}{H_x} = \frac{j\mu_0\omega}{\gamma_0} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}$$
(2.10)

같은 방법에 따라 H_{y} 에 관한 1차원의 파동방정식도 해석이 가능하고, 이렇게 하면 그림 2.2(b)에 나타낸 H_{y} 와 E_{x} 성분을 가지는 평면파에 관해서도 해를 구할 수 있다.





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

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

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

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

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



그림 2.3 손실매질 Fig. Loss material

일례로서 이 스칼라 방정식 (2.12) 및 식 (2.13)으로부터 H_{y} 성분을 소거하고, 이것으로부터 얻어지는 식 (2.5)의 E_{x} 에 관한 파동방정식을 풀이하여 수평 편파에 관한 전자파의 감쇠 상태를 알 수 있다.

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

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

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} + n^2 E_x = 0 \tag{2.16}$$

여기서, β 및 α 는 각각 위상정수 및 감쇠정수라 불리우며, 전자파의 감쇠에는 이 α 가 크게 영향을 준다. 일례로서 앞에서 나타낸 바와 같이 ε 과 μ 가 모두 실 수, σ 가 0인 경우에는 α 는 0이 되어 전자파는 감쇠하지 않는다. 또 $\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''$, μ (실수) 및 $\sigma = 0$ 인 경우에는 n^2 은 식 (2.17)이 된다.

$$n^2 = \omega^2 \hat{\varepsilon} \mu \tag{2.17}$$

이것을 α에 관해서 풀면 다음 식으로 나타내어지고, ε["] 이 존재함으로써 α는 유한의 값이 되어 전자파는 감쇠하게 된다.

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

이상의 이론으로부터, 전자파는 손실매질중에 있어서 ε["], μ["] 과 σ의 효과에 의해 감쇠하는 것을 알 수 있으며, 그 에너지는 열로 변환된다. 그리고 이 관점 으로부터 전파흡수체는 전자파의 감쇠(흡수)가 다음에 나타내는 어느 요인에 기인하는가에 따라 3종류로 분류되며, 또 이때의 단위 면적당의 전파흡수에너 지 *P[W/m²*]는 전계 *E*와 자계 *H*를 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

a) 유전손실 :
$$\varepsilon^{"}$$
 에 기인하는 것으로서 $P = \frac{1}{2}\omega\varepsilon^{"}|E|^{2}$
b) 자성손실 : $\mu^{"}$ 에 기인하는 것으로서 $P = \frac{1}{2}\omega\mu^{"}|H|^{2}$
c) 도전손실 : σ 에 기인하는 것으로서 $P = \frac{1}{2}\sigma|E|^{2}$

단, 고주파에 있어서는, 식 (2.19)에 나타내는 바와 같이 ε["]과 σ를 나누어서 설명할 수 없기 때문에, 어느 쪽의 손실이 지배적인지에 따라 도전성 손실재료 가 되는지 유전 손실재료인지를 분류하고 있다.

$$n^{2} = \omega^{2} \varepsilon^{'} \mu - j \omega^{2} \mu \left(\varepsilon^{''} + \frac{\sigma}{\omega} \right)$$

$$= \omega^{2} \varepsilon^{'} \mu - j \omega^{2} \mu \varepsilon_{t}$$

$$(2.19)$$

여기서 $\varepsilon_t = \varepsilon^{''} + \frac{\sigma}{\omega}$ 이다[12].

2.3 전파흡수체의 분류

2.3.1 전파흡수 재료에 의한 분류

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

(1) 도전손실재료

저항체에 전류를 흘리면 흐르는 전류에 의해 열이 발생한다. 이와 마찬가지 로 유한한 도전율 σ를 가지는 매질에 전계가 가해지면 도전전류가 흘러서, 전 자파 에너지는 열로 변환된다. 이 재료에서는 앞에서 나타낸 식 (2.19)의 관계 가 성립하고, 고주파영역에 있어서도 ε["]이 극히 작은 유전손실재료라고 표현해 도 좋다.

이와 같은 도전성 손실재료에는 도전성섬유를 부직포 형태로 짜서 만든 베나 산화인듐 방울을 증착한 유전체 시트 등이 있다. 또, 이들은 저항피막이라 불리 우며, 그 전기적 특성은 두께를 무시할 수 있는 정방형상의 저항으로서 면저항 치(Ω□)로 표시된다.

(2) 유전손실재료

고주파영역에서는, 매질의 복소유전율의 허수부가 식 (2.19)에서와 같이 *E* 과 *o*로 표현되며, 주파수가 높아질수록 이것들을 따로따로 논하는 것은 불가능하 기 때문에 인가한 전계에 의해 생기는 유전분극에 의한 흡수와 도전전류에 의 한 흡수를 합해서 표현한다. 그리고 이와 같은 흡수재료로는 카본입자를 혼입 한 고무시트, 그라파이트(흑연) 함유 발포 폴리스티로폼, 카본 함유 발포 우레 탄 등이 있다. 특히 그라파이트 함유 발포 폴리스티로폼에 관해서는 그라파이 트 함유량이나 주파수의 변화에 대한 복소유전율을 실험식으로 표현하고 있으 며, 전파암실용의 광대역성을 가지는 다층형 전파흡수체에 사용되고 있다.

(3) 자성손실재료

소결페라이트가 대표적인 것으로, 고무 등에 페라이트를 혼합한 고무 페라이 트 등이 자성 전파흡수재료이다. 복소비유전율의 허수부 μ ["]가 전파흡수에 기여 한다. 상기 (1), (2)의 재료와 달리 자계가 큰 장소에서 전파흡수가 크다. 그러 나 전파흡수기구가 상기와는 다르므로 VHF대에서는 대단히 얇은 전파흡수체 가 실현될 수 있는 것이 특징이다.

2.3.2 층수에 의한 분류

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

(1) 단층형 전파흡수체

전파흡수재료가 한 장의 층으로 되어 있고, 보통 이면에는 알루미늄이나 철 판 등의 금속이 붙어 있다. 저항피막에 의한 형 전파흡수체나, 유전성 전파흡수 재료에 의한 단층형 전파흡수체는 일반적으로 주파수 대역폭이 좁은 협대역형 전파흡수특성을 나타낸다. 단 자성전파흡수체인 페라이트 타일은 비교적 넓은 주파수특성을 나타내는 것이 특징이다.

(2) 2층형 전파흡수체

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

(3) 다층형 전파흡수체

전파흡수체를 구성하는데 층의 수가 많은 것을 다층형 전파흡수체라 한다. 단, 층의 수를 그대로 불러서 3층형 전파흡수체, 4층형 전파흡수체라 부르는 경 우가 있다. 일반적으로 전파흡수체는 다층형으로 구성함으로써 주파수 대역폭 이 넓어진다. 따라서, 광대역 특성이 요구되는 전파무향실용으로는 다층형 전파 흡수체를 이용한다.

2.3.4 용도에 의한 분류

전파흡수체의 구체적인 용도와 그 응용범위에 관하여 설명하고 그것을 표 2.1과 표 2.2로 나타내었다.

(1) 전파장해방지 대책용 전파흡수체

최근 그림 2.4에 나타내는 바와 같이 고층 건축물에 의한 텔레비전 고스트 (ghost) 문제는 사회적 문제까지 되고 있다. 그 대책으로서 안테나의 지향성을 개선하거나 TV 수상기내에서 소거하는 방법, 또는 SHF대에 의한 재방송 등이 있지만, 결정적인 것이 없는 현실이다. 이들 방법 중에서 건축물의 벽면에 전파 흡수체를 붙여 반사파를 적게 하는 방법은 장해를 일으키고 있는 원인을 직접 없앤다는 의미에서 뛰어난 대책법이며, 이미 각 방면에서 실용화되어 있다.



그림 2.4 TV 고스트의 발생 기구 Fig. 2.4 TV Ghost Generator

(2) 레이더 허상방지 대책용 전파흡수체

레이더 허상(false echo)으로서는, 특히 선박의 마스트나 가시거리내의 교량으 로부터의 반사에 의한 문제를 들 수 있다. 예를 들어 그림 2.5에서와 같이 최근 대형교량이 해상에 건설되었고, 이것에 의한 선박용 X-밴드 레이더(주파수 9.375 GHz)의 전파반사에 기인한 레이더의 허상 문제가 야기되고 있다.



그림 2.5 레이더 허상의 발생기구 Fig. 2.5 Radar ghost generator

이 현상은 그림 2.5에 나타내는 바와 같이, 교량으로부터의 반사전파 때문에 선박이 없는 위치에 허상이 나타나거나, 위상관계에 따라서는 선박의 상(像)이 잘 보이지 않게 되는 것으로, 경우에 따라서는 사고의 원인이 된다. 특히, 일본 의 경우 혼슈-시코꾸(本州四國)연락교 공단에서는 이 레이더 전파장해대책을 검토하는 위원회가 설립되어, 그 성과로서 인노시마대교(因島大橋) 양측의 교량 부재의 외면 약 560 m길이에 걸쳐 전파흡수체를 시공하였다.

(3) 전파암실용 전파흡수체

전파암실은 실내의 벽면에 전파흡수체를 붙인 방으로, 내부에서 발생된 전파 는 벽면에서 흡수되어 반사파가 생기지 않으므로 전파적으로 보면 무한공간과 등가가 된다. 따라서 종래부터 안테나의 지향성 실험 등의 목적을 위해서 건설 되어 왔다. 더욱이 최근의 전자파환경문제를 위해, 각종 전자기기로부터의 방사 전자파 평가시험을 위한 전파암실이나 밀리미터파대의 연구개발에 맞추어, 그 범위가 밀리미터파대까지 사용 가능한 전파암실이 시공되고 있다. (4) 밀리미터파대용 전파흡수체

최근 레이더나 통신기 등의 사용 주파수도 밀리미터파대의 높은 영역으로 옮 겨가고 있으며, 그에 따라 밀리미터파대에 대한 전파흡수체의 필요성도 높아져 가고 있다. 이러한 배경에서 밀리미터파 전파흡수체의 연구도 활발해져서 35 GHz대나 60 GHz대, 나아가서 94 GHz대용 고무시트계 전파흡수체나 저항피막 형 전파흡수체의 연구가 진행되고 있다. 한 예로서 사무실이나 공장 등의 실내 에서의 밀리미터파를 이용한 무선 LAN(Wireless Local Area Network)의 실내 이미지를 그림 2.6에 나타낸다. 이 경우 밀리미터파 전파흡수체를 천정이나 바 닥의 벽면에 장착하여, 전파가 이들로부터 다중 반사하는 것을 막아, 정보전달 의 오류율(error rate)을 적게 하고 있다. 따라서 최근 전자파의 인체에 대한 영 향에 관해서 우려하는 목소리가 높아지고 있다. 이러한 배경에서 인체의 전파 흡수율(SAR ; Specific Absorption Rate)을 규명하는 연구가 행해지고 있으며, 이러한 분야에 있어서도 전파흡수체의 역할은 중요해져 왔다[12].



그림 2.6 무선 LAN의 실내 이미지 Fig. 2.6 Inside image of Wireless LAN

표 2.1 전파흡수체의 용도와 구체적인 예

Table 2.1 Application of EM wave absorber and specific examples.

용 도	구체적인 예
레이다 허상방지 대책	 선박레이더의 허상방지 선박마스트, 교량 등 항공관제레이더의 허상방지 건축물(격납창고), 교량등
전파장해 방지대책	• 텔레비젼 고스트 방지대책 건축물 등 • 이동무선 장해대책 실내, 열차 등
전파무향실(암실)	•EMC측정용 전파암실 •마이크로파용 전파흡수체 •밀리미터파용 전파흡수체

표 2.2 전파흡수체의 종류

Table 2.2 The kind of EM wave absorbers.

응용 범위	전파흡수체의 종류
레이다 허상방지 대책용 전파흡수체	 고무-페라이트계 전파흡수체 고무-카본계 전파흡수체 저항섬유계 전파흡수체 금속섬유, 페라이트 다층형 전파흡수체 FRP계 전파흡수체
전파장해방지 대책용 전파흡수체	 페라이트계 전파흡수체 저항섬유계 전파흡수체 저항피막계 밀리미터파 전파흡수체
전파암실용 전파흡수체	 페라이트·카본계 다층형 전파흡수체 카본계 피라미드형 전파흡수체 페라이트·저항필름 다층형 판상재 전파흡수체

2.3.5 주파수 특성에 의한 분류

전파흡수능은 허용 반사계수가 미리 설정된 값인 S이하로 측정되는 특성을 갖는 것을 말하므로, 그 허용치 이하로 되는 주파수 비대역폭 Δf/f₀로부터 협 대역형, 광대역형, 초광대역형으로 분류된다.

(1) 협대역형 전파흡수체

주파수 비대역폭 Δf/f₀가 약 10 %정도 이하, 또는 경우에 따라서 20 %이 하의 전파흡수를 협대역형 전파흡수체라 한다. 레이더 주파수용 등 사용주파수 대역폭이 좁은 경우에 이용된다. 이 협대역형 전파흡수체의 주파수 특성은 단 봉특성을 나타내고, 주로 단층형 전파흡수체로 충분하다.

(2) 광대역형 전파흡수체

사용주파수가 넓은 전파흡수체를 광대역형 전파흡수체라 한다. 협대역형과 구별은 명확하지 않으나 비대역폭(Δf/f₀)이 20 %이상 또는 30 %이상의 것이 다. 이 광대역형 전파흡수체를 얻기 위해 2층형 구조로 하기도 한다. 또 소결페 라이트 타일 등의 단층형 전파흡수체도 이 광대역형이다.

(3) 초광대역형 전파흡수체

어느 하한 주파수 f_L 이상의 주파수 전역에서 허용 반사계수 이하가 되는 특 성을 갖는 전파흡수체를 초광대역형 전파흡수체라 부른다. 따라서, 주파수비대 역폭은 무한대가 되어 정의할 수 없다. 층의 수가 적은 전파흡수체에서는 이러 한 특성이 얻어지지 않고, 보통 다층형 전파흡수체에 의해서 실현된다[5],[13].

2.4 정합조건

2.4.1 단층형 전파흡수체

두께 d의 전파흡수체를 판상으로 하여 금속판 위에 놓은 경우, 평면파의 수 직입사에 대한 파동임피던스 z는 진공중의 평면파 파동임피던스로 정규화하여 식 (2.20)과같이 주어진다.

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

여기서 λ 는 입사한 평면파의 진공중의 파장이며, ε_r 은 비유전율($\varepsilon/\varepsilon_0$), μ_r 은 비 투자율(μ/μ_0)이다. 또 반사계수 $S = \frac{\hat{z}-1}{\hat{z}+1}$ 이므로, 완전한 전파흡수체로 되기 위 한 조건은 S = 0으로부터 \hat{z} 가 1이 되는 것이다. 즉, 전파흡수체의 완전정합 조 건은 식 (2.21)과 같다.

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

(1) 비자성 재료(유전체재료)의 경우

비자성 재료란 자석에 붙지 않는 것으로서, μ=μ₀(진공상태) 즉, μ_r=1인 재료를 말한다. 예를 들면 나무, 종이, 고무, 플라스틱, 탄소, 우레탄 등이 여기 에 포함된다. 따라서, 식 (2.21)의 비투자율 μ_r을 1로 두면 식 (2.22)과 같이 된 다.

$$1 = \sqrt{\frac{1}{\varepsilon_r}} \tanh\left(j\frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{\varepsilon_r}\,d\right) \tag{2.22}$$

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

(2) 자성 재료의 경우

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

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 (2.23)를 고쳐 쓰면

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

$$\omega = j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\varepsilon_r \mu_r} d$$
(2.24)

식 (2.24)의 관계를 만족하는 재료(μ_r, ε_r, d)가 있으면 전파흡수체는 가능하 나 목표는 d<< λ의 조건하에서 식 (2.24)를 만족시켜야 하는 것이다. d<< λ 의 경우 식 (2.24)에서 ω의 절대치 |ω|는 |ε_rμ_r|로 큰 경우와 작은 경우가 고려 된다.

(1) 근사해

ω<<1인 경우, tanhω≒ω로 놓을 수 있으며, 식 (2.23)를 다음과 같이 변형 할 수 있다.

$$1 = \sqrt{\frac{1}{\varepsilon_r}} \left(j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\varepsilon_r \,\mu_r} \, d \right) = j \frac{2\pi}{\lambda} \,\sqrt{\mu_r} \, d \tag{2.25}$$

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

$$1 = \frac{2\pi}{\lambda} \mu_r^{"} d + j \frac{2\pi}{\lambda} \mu_r^{'} d \tag{2.26}$$

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

$$d = \frac{\lambda}{2\pi\mu_r} \tag{2.27}$$

가 된다.

페라이트재의 μ_r의 주파수 특성은 공명주파수 f_r보다 높은 주파수대에서는 상기 정합 조건을 근사적으로 만족할 수 있다. 이 경우 두께 d에 재료의 유전 율 ε_r이 관계하지 않는 것은 d<< λ이며, 재료는 금속판에 부착되어 있으므로 재료의 내부에서 자계는 크지만 전계는 매우 약하기 때문이다. 따라서 전계에 동작하는 ε_r효과는 나타나지 않는 것이다[14].

(2) 엄밀해

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

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

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

이러한 조작으로 주어진 재료가 어떤 주파수에서 어느 두께일 때에 전파흡 수체로 되는가가 구해진다. 페라이트의 μ_r은 공명주파수 f_r보다 높은 주파수 범위에서는 변화의 양이 크므로, 주파수에 의한 ε_r"의 변화가 거의 없는 통상의 유전체와 같이 d/λ 를 결정해서 하나의 변수로 취급할 수가 없다. 또, 페라이트 전파흡수체는 특정 두께 (정합두께 d_m)에서 특정주파수 (정합주파수 f_m)의 전 파만이 무반사 조건을 만족한다. 이에 비해 통상의 손실을 가지는 유전체의 경 우에는, 무반사 조건으로 해서 재료의 두께 d와 전파의 파장 λ의 비만이 결정 되는 것이다. 따라서 각종 파장의 전파에 대해서 재료의 두께 d를 변환시키면 무반사 조건을 만족시킬 수 있다. 하지만 페라이트와 같이 μ_r이 주파수에 따라 크게 변화하는 경우에는 정합주파수가 모두 각각 유일하게 정해진다[8],[15].

2.4.2 다층형 전파흡수체

페라이트 전파흡수체를 광대역하기 위하여 페라이트 층 사이에 공기층을 삽 입하거나 재료정수가 다른 페라이트 전파흡수체를 2개 이상의 층으로 조합한 모양, 또는 재료정수는 동일한 물질이나 전파흡수체의 형상을 공간적으로 변화 시킴으로써 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 변화 시켜서 임피던스 정합을 꾀하는 것이다. 이 경우 금속판으로부터 거리 $_{\mathcal{X}}$ 인 점 에서의 규격화 입력임피던스 Z_x 는 다음의 미분방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{dZ_x}{dx} = j \frac{2\pi}{\lambda} \left(1 - \varepsilon_{r\,x} \, Z_x^2 \right) \tag{2.29}$$

여기서, λ : 입사파의 파장

 ε_{rx} : x에 있어서의 매질의 복소유전율

이라 하고 투자율에 대해서는 자유공간중의 μ₀가 매체중에서도 변화하지 않는 것으로 한다. 또 전파흡수체 표면에서의 규격화 입력임피던스를 Z라 하면, 이 점에 있어서의 반사계수 S는 식 (2.30)와 같다.

$$S = \frac{\hat{z} - 1}{\hat{z} + 1} \tag{2.30}$$

따라서, 흡수체가 무반사로 되기 위한 조건은 Z=1이다. 그러나 이것을 완 전히 실현하는 것은 어려우므로 허용 반사계수를 S₀라 했을 때, 실용 정합조건 은 다음 식 (2.31)과 같은 식이 된다.

$$\frac{\hat{z} - 1}{\hat{z} + 1} \le |S_0| \tag{2.31}$$

따라서 식 (2.31)을 조건으로 하여 식 (2.29)를 풀어서 Z_x를 구하면 된다. 그 러나 식 (2.29)는 Riccati의 비선형 미분방정식으로 범함수이므로 해석적 방법으 로 해를 구하는 것은 어렵다. 그래서 금속판 표면으로부터 거리 _x에 대한 임피 던스의 분포를 각각 가정하고, 그때의 반사계수의 주파수 특성을 계산하여 최 적인 임피던스 분포를 찾는 방법이 사용되고 있다. 여기서 $|S_0| < 0.1$ 인 경우, 필 요한 두께의 최소치는 $1/\lambda = 0.35$ 정도이며 이때 ε_{rx} 의 값은 식 (2.32)와 같이 된다.

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

그러나, 실제 이와 같은 ε_{rx} 의 분포를 실현하는 것은 어려우므로 부분적으 로 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 그 림 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 손 실재료로 구성하려고 하면 전파흡수체의 두께가 매우 두꺼워지게 되어 실용적 이 못하다. 즉, 이러한 전파흡수체는 허용 정재파비를 1.1로 할 때 사용최저주 파수의 파장 λ에 대해서, 전파흡수체의 두께는 0.6λ_d로 되므로 100 MHz정도 의 주파수대에서 사용할 전파흡수체의 두께는 1.8 m나 된다. 그러나 자성재료 인 페라이트를 이용하면 30 ~ 1,000 MHz 정도의 비교적 낮은 주파수대에서도 박층으로 광대역 특성을 만족시킬 수 있다. 이것은 페라이트의 투자율이 주파 수 의존성이 크다는 점을 이용한 것으로, 두께 8 mm 정도에서 100 % 전후의 비대역폭이 얻어 진다. 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.

2.4.3 광대역형 전파흡수체

(1) 광대역화 전파흡수체의 기본식

그림 2.8과 같이 전파흡수체의 뒤에 금속판을 부착하고, 그 전면에 n개 층의 전파흡수체를 적층한 경우, 제 n층의 두께를 d_n , 비투자율을 μ_{rn} , 비유전율을 ε_{rn} 으로 했을 때 평면파가 흡수체 전면에서 수직으로 입사하면, n층의 전면에서 우측을 보는 규격화 입력임피던스 Z_n 은 식 (2.33)과 같이 된다.

$$Z_{n} = Z_{cn} \frac{Z_{n-1} + Z_{cn} \tanh(\gamma_{n} d_{n})}{Z_{cn} + Z_{n-1} + \tanh(\gamma_{n} d_{n})}$$

$$(n = 1, 2, 3, \dots, n)$$
(2.33)

여기서 Z_{cn} 은 제 n층의 특성임피던스, γ_n 은 전파정수로서 각각 다음과 같다.

$$Z_{cn} = \sqrt{\mu_{rn} / \varepsilon_{rn}} \tag{2.34}$$

$$\gamma_n = j\omega \sqrt{\mu_{rn} \varepsilon_{rn}} \tag{2.35}$$

따라서 식 (2.34)와 식 (2.35)를 대입하여 정리하면 다음 식 (2.36)과 같다.

$$Z_{n} = \sqrt{\frac{\mu_{rn}}{\varepsilon_{rn}}} \frac{Z_{n-1} + \sqrt{\frac{\mu_{rn}}{\varepsilon_{rn}}} \tanh\left(j\frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{\mu_{rn}\varepsilon_{rn}}d_{n}\right)}{\frac{\sqrt{\mu_{rn}}}{\varepsilon_{rn}} + Z_{n-1} \tanh\left(j\frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{\mu_{rn}\varepsilon_{rn}}d_{n}\right)}$$
(2.36)

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

$$S_n = \frac{Z_n - 1}{Z_n + 1} \tag{2.37}$$

과 같이 된다.

따라서, 허용반사계수를 |S₀|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 (2.37)에 의하면 이 미 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 흡수체층을 추가함으로써 기존 단층 전파흡수체로 흡수할 수 없는 주파수대에서도 흡수특성이 뛰어난 전파흡 수체를 설계하는 것이 가능하다[6].




제 3 장 전파흡수체 설계 이론 및 측정법

3.1 전파흡수체의 분포정수회로화

3.1.1 파동방정식(Helmholtz Equation)

(1) 단순매질영역의 파동방정식

장(field)을 만드는 전원(source)*J*, ρ의 분포로부터 멀리 떨어져 있는 손실이 없는 단순매질 영역에서 맥스웰 방정식은

$$\nabla \times \boldsymbol{E} = -\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} \tag{3.1}$$

$$\nabla \times \boldsymbol{H} = \boldsymbol{J} + \frac{\partial \boldsymbol{D}}{\partial t} \tag{3.2}$$

여기서 **J**=σ**E** 이며 σ는 매질의 손실을 나타내는 도전율 이다.

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

$$\nabla^2 \boldsymbol{E} = \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \boldsymbol{E}}{\partial t^2} \tag{3.3}$$

$$\nabla^2 \boldsymbol{H} = \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \boldsymbol{H}}{\partial t^2} \tag{3.4}$$

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

$$\nabla^2 \boldsymbol{E} + \omega^2 \mu \varepsilon \boldsymbol{E} = \nabla^2 \boldsymbol{E} + \gamma^2 \boldsymbol{E} = 0 \tag{3.5}$$

$$\nabla^2 \boldsymbol{H} + \omega^2 \mu \boldsymbol{\varepsilon} \boldsymbol{H} = \nabla^2 \boldsymbol{H} + \gamma^2 \boldsymbol{H} = 0 \tag{3.6}$$

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

$$\frac{\partial E_y}{\partial z} = j\omega\mu H_x \tag{3.7}$$

$$\frac{\partial H_x}{\partial z} = j\omega\varepsilon E_y \tag{3.8}$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial z} = -j\omega\mu H_y \tag{3.9}$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial z} = -j\omega\varepsilon E_x \tag{3.10}$$

식(3.7) ~ 식(3.10)를 고려하면 식(3.5)와 (3.6)은 다음과 같은 평면파의 파동 방정식으로 되어

 $\nabla^2 E_x + \gamma^2 E_x = 0 \tag{3.11}$

$$\nabla^2 H_y + \gamma^2 H_y = 0 \tag{3.12}$$

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

$$E_{r} = E^{+}e^{-\gamma z} + E^{-} + e^{\gamma z}$$
(3.13)

$$H_{y} = \frac{1}{Z_{c}} \left(E^{+} e^{-\gamma z} - E^{-} + e^{\gamma z} \right)$$
(3.14)

이것은 파수벡터 γ가 **H**에 직교할 뿐 아니라 **E**에도 직교하는 것을 나타내 고 또한 포인팅 벡터를 구해보면 파수벡터γ 방향으로 방사전력이 나가는 것을 의미한다. 전파흡수체에서는 이러한 방사전력이 반사 없이 흡수되어야 함을 전 제로 한다.

평면파에서 방사전력 총량은 Re(s)에 수직한 전 평면에 걸쳐 적분함으로서 구할 수 있으나 무한평면이므로 방사전력의 총량도 무한대로 되어 실제적으로 평면파는 물리적으로 실현할 수 없는 파동이 된다. 미소 전류원에 의한 파동방 정식의 해에 주목해보면 구면파는 $r^{-1}e^{-j\gamma r}$ 의 인자를 가지는데 포인팅 벡터로 방사전력총량을 구하면 유한치가 된다. 거리가 매우 큰 곳에서는 거리를 조금 변화시켜도 거리의 변화율은 극히 적다. 이것에 대하여 $e^{-j\gamma r}$ 항은 거리의 미소 변화에도 민감하게 변한다. 따라서 전류원으로부터 멀리 떨어진 곳에서의 구면 파를 부분적으로 조사 할 때는 수식적으로 간단하기 때문에 평면파로 취급할 수 있게 된다[13],[16].

(2) 분포정수회로의 파동방정식

다음으로 일반적인 전송선로의 분포정수회로에 대하여 생각해 본다. 높은 주 파수대역에서 두 개 이상의 도체로 구성된 전력 전달 선로(Transmission Line) 에서 길이 방향으로 그 특성이 일정한 선로는 특성 Impedance와 전파정수로 정의되며 이러한 선로는 분포정수회로로 해석된다. 여기서 R은 단위길이당 저 항성분(Ω/m)으로 도체의 불완전한 상태를 표시하며, L은 단위길이당 인덕턴스 (H/m), G는 단위길이당 콘덕턴스 성분(℧/m)으로 유전체 손실여부를 의미하 며, C는 단위길이당 커패시턴스 성분 (F/m)을 의미한다.

마디 AB에서 KVL을 적용하고, 마디 BC에서 KCL을 적용하면

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

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

여기서 ∠는 선로를 진행하는 거리함수이다.

R=0,G=0 인 무손실 전송선로(losslessline)에서 식(3.15)와 (3.16)의 페이저 표현은

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

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

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

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

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

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

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

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

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



그림 3.1 일반적인 전송선로 Fig. 3.1 General transmission line.



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

3.1.2 분포정수회로화

먼저 식(3.9)와 (3.10) 및 (3.17)과 (3.18)에서

$$\mu = \mu' - j\mu'' \tag{3.23}$$

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' \tag{3.24}$$

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

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

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

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

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

이 되어 식(3.25) ~ (3.28)을 비교하면 같은 형태의 식으로 대응한다.

따라서 다음 파라미터를 치환하여도 양자는 일치됨을 알 수 있다. 즉, 분포정 수회로에서의 V, I는 개념적으로 E_x, H_x 에 대응하며 마찬가지로 분포정수회로 의 L, C, R, G는 전자장에서 μ' , $\epsilon', \omega\mu''$, $\omega\epsilon''$ 에 대응하게 된다. 이것을 정리하면

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

으로 되고, 이러한 대응관계를 분포정수회로의 전파정수에 적용하면

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

이 되며, 또한 선로 특성임피던스는

$$Z_{C} = \sqrt{\frac{Z_{S}}{Y_{P}}} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} = \sqrt{\frac{(\omega\mu^{\prime\prime} + j\omega\mu^{\prime})}{(\omega\varepsilon^{\prime\prime} + j\omega\varepsilon^{\prime})}} = \sqrt{\frac{\mu^{\prime} - j\mu^{\prime\prime}}{\varepsilon^{\prime} - j\varepsilon^{\prime\prime}}} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}$$
(3.31)

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

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

또한 공기 중에서의 ε', μ' 의 값은 1이고 ε'', μ'' 의 값은 0이므로

$$\varepsilon = \varepsilon_o \, \varepsilon_r = \varepsilon_o \left(\varepsilon' - j \varepsilon'' \right) = \varepsilon_o \tag{3.33}$$

$$\mu = \mu_o \mu_r = \mu_o (\mu' - j\mu'') = \mu_o \tag{3.34}$$

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

$$Z_O = \sqrt{\frac{\mu_o}{\varepsilon_o}} = 120\pi \cong 377\Omega \tag{3.35}$$

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

$$z_c = \sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}} \tag{3.36}$$

로 소문자로 나타내기로 한다.

또한 진공중과 임의의 매질에서 전파정수는 각각

$$\begin{split} \gamma_{o} &= j\beta_{o} = j\omega\sqrt{\varepsilon_{o}\mu_{o}} \end{split} \tag{3.37} \\ \gamma &= \sqrt{ZY} = \sqrt{(R+j\omega L)(G+j\omega C)} = \sqrt{\omega\mu''+j\omega\mu')(\omega\epsilon''+j\omega\epsilon')} \\ &= \sqrt{j\omega(\mu'-j\mu'')j\omega(\epsilon'-j\epsilon'')} = j\omega\sqrt{(\mu'-j\mu'')(\epsilon'-j\epsilon'')} \\ &= j\omega\sqrt{\epsilon\mu} = j2\pi f\sqrt{\epsilon\mu} = j2\pi \frac{1}{\lambda\sqrt{\epsilon_{o}\mu_{o}}} = j\frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{\epsilon_{r}\mu_{r}} \end{split} \tag{3.38}$$

로 되어 분포정수회로 상의 파라미터*R*, *L*, *C*, *G*를 전자장 Parameter로 변환 시킬 수 있다.

전기회로 내에서 전력을 소비하는 역할을 하는 것은 저항 R과 콘덕턴스 G 이다. 유전율 ε (= $\varepsilon'-j \varepsilon''$)과 투자율 μ (= $\mu'-j\mu''$)에 주목하여 보면 R과G에 대응하는 것은 각각의 복소성분 μ'' 과 ε'' 로서 L과C는 무효손실이며 R과G는 유효손실이 된다. 이것은 회로이론에서 무효전력과 유효전력의 벡터 합이 피상 전력이 되는 것으로 이해할 수 있다. 많은 전파흡수체는 도체금속판의 앞에 적 당한 얇은 재료를 한 장 또는 여러 장을 배치하여 만든다. 전자파의 입사 방향 에서 보면 공기층과 전파흡수체 층으로 놓여진 것으로 된다. 여기에 사용된 재 료정수는 투자율 μ 와 유전율 ε 을 가지고 있다. 이 들 재료정수를 식(3.29)에 적 용하면 분포정수회로화 할 수 있다.

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

반사파는 전자파가 진행하는 매질의 임피던스와 부하임피던스의 부정합에 의 한 것으로 이 부분을 정합시킴으로서 반사파 성분을 제거 할 수 있고 전파흡수 체 경우 전자파가 진행하는 매질의 임피던스와 전파흡수체의 임피던스를 정합 시킨 것이라 할 수 있다.

식(3.21)과 (3.22)를 쌍곡선함수로 표현하여 분포정수회로 임의의 점 d에서 임 피던스는

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

가 된다.

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

$$Z_{in} = Z_C \tanh \gamma \, d \tag{3.40}$$

가 된다. 여기서 d는 전파흡수체의 두께에 해당되며 Z_C 는 전파흡수체 특성임 피던스이다. 따라서 식(3.38)~(3.40)에 식(3.30)~(3.32)를 적용하면 수전단에서 뚜께d떨어진 전파흡수체 표면에서의 임피던스는

$$Z_{in} = Z_C \tanh\gamma \, d = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \, \tanh\left(j\omega\sqrt{\varepsilon\mu}\right) d \tag{3.41}$$

정규화(normalization)시키면

$$z_{in} = \sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}} \tanh\left(j\omega\sqrt{\varepsilon_r\,\mu_r}\,\right)d\tag{3.42}$$

이 된다.

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

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

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

$$\Gamma_{I}(z) = \frac{-V^{-}e^{-\gamma z}/Z_{o}}{V^{+}e^{\gamma z}/Z_{o}} = -\frac{V^{-}}{V^{+}}e^{-2\gamma z} = -\Gamma_{V}(z)$$
(3.44)

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

따라서 임의의 점 * 에서 부하단을 본 임피던스는

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

정규화 시키면

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

또 반사계수를 정규화 임피던스로 나타내면

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

이 된다. 반사계수 *Γ* 는 0~1까지의 값을 갖는데 전파흡수체에서는 *Γ* 가 적을 수록 전파의 흡수능이 뛰어나나고 볼 수 있다. 가령 *Γ* 가 극단적으로 0이면 무 반사이므로 전자파 에너지의 완전 흡수가 일어나고 / 가 1이면 완전반사로 전 파흡수는 일어나지 않는다[17].



(a) 1매의 전파흡수체

(b) (a)의 분포정수회로화

그림 3.3 전파흡수의 기본 구성

Fig. 3.3 Basic composition of a EM wave absorber.

3.2 전파흡수체 재료와 측정

3.2.1 손실재료

(1) 전파흡수재료의 종류

전파흡수재료로는 여러 가지가 있으나 크게 나누면 도전성 전파흡수재료, 유 전성 전파흡수재료, 자성 전파흡수재료로 분류할 수 있다.

도전성 전파흡수재료는 저항체(抵抗体), 저항선(抵抗線), 저항피막(抵抗皮膜) 에 흐르는 도전전류에 따라 전파를 흡수하는 것으로 흡수에 필요한 적절한 저 항치를 갖는 것이 중요하며 도전성 섬유 같은 직물로부터 양호한 전파흡수체가 얻어지고 있다.

유전성 손실재료로는 카본고무, 카본 함유 발포우레탄, 카본함유 발포 폴리에 치렌 등과 같은 것들을 들 수 있고 광대역 특성을 얻기 위해 다층구조로 하고 있으며 이때 각층의 감쇠 특성은 매우 중요한 제어인자가 된다. 미국의 경우 피라미드형이 많으며 이것은 전파의 흡수 이외에도 여러 방향으로 전파를 산란 시킨다. 자성 손실재료의 대표적인 것으로 페라이트가 있다. 금속판을 이면에 부착한 페라이트는 비교적 넓은 주파수대역에 걸쳐 양호한 흡수특성을 나타낸다. 정합 주파수는 재료에 따라 결정되지만 대체적으로 0.3~1.5 GHz 대역에서 우수한 흡수특성을 나타내며 페라이트에 고무를 혼합하여 그 혼합비에 따라 정합주파 수를 변화시키는 기법도 보고되고 있다.

식(2.1.12)에서 전파손실을 가지는 재료의 유전율과 투자율은 복소수로서 그 복소유전율과 복소투자율은 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mu_r = \mu_r' - j\mu_r'' \tag{3.49}$$

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r'' \tag{3.50}$$

여기서 허수부는 손실항을 나타내며 만약 재료가 ε_r"=μ_r"=0 이면 무손실 재료가 되므로 ε_r", μ_r"둘 중 적어도 하나가 0이 되지 않는 경우에 전파흡수가 일어나지 않는다. 세 종류의 전파흡수재료의 복소유전율과 복소투자율 관계를 표 3.2에 나타내었다. 표 3.2 에서처럼 자성 전파흡수재료는 가해진 자계에 따 라 전파흡수가 일어나고 복소비투자율의 허수부 μ_r"이 영이 되지 않는 경우이 다. 이때 복소비유전율 ε_r"는 0이 되거나 그렇지 않거나 관계없이 흡수가 일어 난다. 재료 중에는 이렇게 자성손실과 같이 유전손실 또는 도전손실을 가지는 재료도 있다. 여기서 복소비유전율의 실수부가 μ_r'≠1인 것을 자성체라 부르고 μ_r"=0 이면 무손실 자성체라 한다.

도전성 전파흡수재료와 유전성 전파흡수재료는 다같이 μ_r'=1, μ_r"=0이다. 이 두 가지 흡수재료의 차이점은 먼저 회로이론의 직류회로에서 옴의법칙이 적 용되는 저항율ρ[Ω·m]을 도입하여 높은 주파수에서도 도전전류는 흐르는 것 으로 가정한다. 복소비유전율ε_r"과 저항율 ρ[Ω·m] 도전율χ를 이용하여 나 타내면

$$\varepsilon_r^{\ \prime\prime} = \frac{1}{\omega \varepsilon_o \rho} = \frac{\chi}{\omega \varepsilon_o} \tag{3.51}$$

이 된다. 사용주파수에 따라 이 식을 만족하는 재료 혹은 근사적으로 이 식에 가까운 재료를 도전성 전파흡수재료라 부른다. 그러나 유전체 경우 손실체 등 을 혼합한 재료는 이 식을 만족하지 않는데 그 이유는 이렇게 혼합한 재료에서 는 저항체가 유전체 전체에 분산되기 때문이고, 그 등가회로는 복잡하게 된다. 따라서 직류에는 전류가 흐르지 않기 때문에 저항율 ρ는 굉장히 크고 높은 주 파수가 되면 정전용량으로 전류가 흘러 저항에도 전류가 흐르므로 전파손실이 크게 나타난다. 따라서 직류 저항율ρ를 사용한 위의 식은 이와 같은 매질에서 는 성립되지 않는다.

(2) 도전손σ・유전체손ε["], · 자성체손μ["]

전파흡수체의 재료가 무손실(R = G = 0)이고, 부하가 도체판으로 단락되어 있 다면 종단을 단락한 길이d에서 정규화(normalization)임피던스는 식(3.40)으로 부터

$$z_d = j R_c \tanh\beta \, d \tag{3.52}$$

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

$$\nabla \times \boldsymbol{E} = -\mu_r \frac{\partial \boldsymbol{H}}{\partial t} = -j\omega\mu_r \boldsymbol{H} = -j\omega(\mu_r' - j\mu_r'')\boldsymbol{H}$$
(3.53)
$$\nabla \times \boldsymbol{H} = \boldsymbol{J} + \varepsilon_r \frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial t} = \sigma \boldsymbol{E} + j\omega\varepsilon_r \boldsymbol{E} = (\sigma + j\omega\varepsilon_r)\boldsymbol{E} = j\omega\left(\varepsilon_r - \frac{\sigma}{\omega}\right)\boldsymbol{E}$$

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

이 된다.

식(3.53)의 $\mu_{r}^{\prime\prime}$ 은 자성손실항을 나타내며 식(3.54)에서 도전율 σ 를 고려한 $\epsilon_{r}^{\prime\prime}$ 은

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r + \frac{\sigma}{\omega} \tag{3.55}$$

로 되어 도전손실항과 유전체손실항인 σ 와ε'''로 나타낼 수 있다.

식(3.55)을 보면 복소유전율 ϵ_r "는 순수한 유전손실만을 나타내는 ϵ_r "과 도전 손실을 나타내는 σ/ω 의합으로 구성되어 그 재료가 가지는 고유의 허수항인 ϵ_r "과 재료의 도전율 σ 를 높이면 ϵ_r "가 증가하게 됨을 알 수 있다. 그러나 도전손실항 σ/ω 은 주파수가 높아지면 그 값은 대단히 적어진다. 따라서 전자 파의 에너지 손실은 도전손 σ 와 유전체손실 ϵ_r " 자성손실 μ_r "에 의하여 일어 나며 전파흡수체는 이러한 재료정수 σ , ϵ_r ", μ_r "를 갖는 재료로 구성되어 진다.

따라서 이러한 재료를 얻기 위하여 도전손실 σ, 유전손실 ε_r^{'''}, 자성체손실 μ_r^{''}의 손실재료를 사용하거나 이러한 재료를 적당히 혼합하여 복합재료로 사 용하는 방법들이 있다. 또한 각각의 재료를 기하학적인 배치로 공간적으로 달 리 하는 법도 개발되고 있다. (3) 전파흡수체 설계 시 고려사항

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

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

$$Z(d) = Z_c \tanh \gamma \, d = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \tanh \left(j\omega \sqrt{\varepsilon \mu} \right) d \tag{3.56}$$

$$z(d) = z_c \tanh \gamma \, d = \sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}} \tanh \left(j\omega \sqrt{\varepsilon_r \, \mu_r} \right) d \tag{3.57}$$

로 표현되어 이것은 어떠한 주파수의 전자파에 대해서 자유공간의 파동 임피던 스인 377[Ω]이 되어야 완전한 흡수가 일어남을 의미한다. 그러나 z(d) = ω 함 수(주파수함수)이므로 μ_r 와 ϵ_r 을 고정시켜 놓고 주파수가 변화하면 z(d) 값이 변하여 가변 주파수에 대해서 임피던스 정합이 곤란해지므로 전파흡수체 설계 시 흡수하려고 하는 주파수를 고려하여야 한다. 또한 자성체에서 비투자율 μ_r 는 입사 방향에 대해서 값이 분산되는 Tensor form 으로 전계와 자계의 입사 방 향에 따라 μ_r 값이 달라지게 되어 결국 파동 임피던스 값이 입사각에 대해서 변화하게 되므로 전계의 입사각에 대한 고려를 하여야 한다. 또 평면파에서 전 계와 자계가 z 방향으로 수직하여 진행하는 경우 편파에 따라 전파흡수체의 특 성이 달라지므로 전계의 방향도 염두에 두어야 한다.

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

우선 공간적인 방법에서는 손실재료를 구조적으로 sheet상 또는 판상을 한층 또는 다층으로 중첩시키는 방법이 있다. 한 장의 층으로 되어 있는 단층형 전 파흡수체는 흡수체 이면에 알루미늄이나 철판 등의 금속이 붙여 실현한다. 저 항피막에 의한 λ/4 형 전파흡수체나 유전성 전파흡수재료에 의한 단층형 전파 흡수체는 일반적으로 비교적 좁은 협대역 전파흡수특성을 나타내는 반면 페라 이트 타일의 경우는 비교적 넓은 주파수 특성을 나타낸다. 표 3.1에서 전파흡수 체의 분류를 나타내었다.

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

표 3.1 전파흡수체 분류

Га	ble.	3.1	А	classification	of	ΕM	wave	absorber.
----	------	-----	---	----------------	----	----	------	-----------

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

표 3.2 전파흡수체의 재료정수 조건

Table. 3.2 A	ł	material	constants	of	EΜ	wave	absorber.
--------------	---	----------	-----------	----	----	------	-----------

재료	$\varepsilon_{r}^{''}$ 의 조건	$\mu_{r}^{'}\mu_{r}^{''}$ 의 조건
도전성	$\varepsilon'' = 1/\omega\varepsilon$ o	
전파흡수재료	$c_r = 1/\omega c_0 p$	$\mu_r' = 1 ,$
유전성	$e'' \neq 1/\omega e o$	$\mu_r^{\prime\prime} = 0$
전파흡수재료	$c_r \neq 1/\omega c_o p$	
자성	a"−0 III \ a" ≠ 0	$\mu_r{}'=1$,
전파흡수재료	$\varepsilon_r = 0 \ \mathrm{rec} \varepsilon_r \neq 0$	$\mu_r^{\prime\prime} \neq 0$

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

(4) 허용반사계수

전파흡수체에서 요구되는 특성은 주파수특성과 전파흡수체 두께와의 관계로 평가된다.

현실적으로 완전흡수조건을 충족하는 전파흡수체의 실현은 어려우므로 전파 흡수체의 성능평가지수로 허용반사계수 Γ의 값을 설정하고 설계 된 전파흡수체 의 특성이 이 값을 만족할 때 허용하는 것으로 하고 있다.

전압에서 허용반사계수 $|\Gamma_o|$ 는 전력에서는 $|\Gamma_o|^2$ 이 되며 예를 들면 전압 허용반사계수가 $|\Gamma_V| = 0.1$ % 라면 전력 허용반사계수는 $|\Gamma_P|^2 = 1$ % 가 되고 반사감쇄량은 dB 로 $-20\log |\Gamma|^2$ 를 취하여 20 dB가 된다. 여기서 반사감쇠량 을 20~30 dB 에 주목해 보면 전력 허용반사계수량은 0.09 ~1 %가 된다.

따라서 허용반사계수 | Γ_o | 에 대하여 | Γ | ≤ | Γ_o | 를 만족하면서 전파흡 수체의 두께를 경제적으로 되도록 얇게 또 주파수 대역폭을 넓게 하는 것이 필 요하게 된다. 이러한 전파흡수체의 성능지수로서 협대혁 전파흡수체에서는 어 떤 주파수 f_o 부근의 대역폭 B^{\pm} $|\Gamma| \leq |\Gamma_o|$ 를 만족시키는 조건하에 비대 역폭 F는

$$F = \frac{\Delta f}{f_o} \tag{3.58}$$

가 되고, 광대역에서는 최저사용가능주파수 f_L 에 대해서 $f \ge f_L$ 에서 $|\Gamma| \le |\Gamma_o|$ 를 만족시킬 때 진공 중 파장 λ 로 나눈값

$$F = \frac{d}{\lambda_L} \tag{3.59}$$

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

협대역 전파흡수체는 그림 3.4(b)와 같이 주파수 비대역폭 Δf/f_o이 약 10 % ~ 20 %이하의 전파흡수능을 가지고 레이더와 같이 사용주파수 대역폭이 좁은 경우에 사용되며 주파수 특성은 단봉특성을 나타내고 주로 단층형 전파흡 수체로 실현된다. 광대역형 전파흡수체 사용주파수가 넓은 전파흡수체로서 협 대역형과 구별은 명확하지 않으나 비대역폭 Δf/f_o의 20 % ~ 30 % 정도의 것으로 본다. 또한 초광대역형 전파흡수체는 그림 3.4(c)와 같이 어느 하한 주 파수 f_L이상의 주파수 전역에서 허용 반사계수 이하가 되는 특성을 갖는 전파 흡수체를 말하며 주파수 비대역폭은 무한대로 보통 다층형 전파흡수체에 의해 서 실현된다.





그림 3.4 전파흡수체 주파수 특성 Fig. 3.4 The frequency characteristic of EM wave absorber.

(1) 개방 단락법



그림 3.5 시료를 삽입한 동축선로

Fig. 3.5 The coaxial line inserted EM wave absorber.



그림 3.6 개방·단락법 Fig. 3.6 Open·Short Line

그림 3.5는 우리가 일반적으로 접할 수 있는 동축관으로 공기층의 종단에 전 파흡수체 재료를 삽입한 상태로 이것을 등가적으로 그림 3.6에 나타내었다. 그림 3.6(a)에서 전파흡수체의 두께d의 종단을 단락한 경우와 그림 3.6(b)와 같이 시료 종단에서 λ/4만큼 떨어진 곳을 단락 한 경우의 입력에서 시료 측으 로 들여다 본 입력 임피던스를 각각 측정으로 구한다.

여기서 식(3.39)을 정규화(normalization) 시키면

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

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

$$z_s = z_c \tanh \gamma \, d \tag{3.61}$$

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

$$z_o = z_c \coth \gamma \, l \tag{3.62}$$

로 개방상태가 된다.

단락임피던스와 개방임피던스 식(3.61)와 (3.62) 두 식을 곱하면 특성임피던스 는

$$z_c = \sqrt{z_s \cdot z_o} \tag{3.63}$$

식(3.61)와 (3.62) 두 식을 나누면

$$\tanh\gamma\,d = \sqrt{\frac{z_s}{z_o}}\tag{3.64}$$

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

이 된다.

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

$$z_c = \sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}} \tag{3.66}$$

$$\gamma = j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\varepsilon_r \,\mu_r} \tag{3.67}$$

두 식으로부터 비유전율과 비투자율은

$$\varepsilon_r = -j\frac{\lambda}{2\pi} \cdot \frac{\gamma}{z_c} \tag{3.68}$$

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

가 되어 복소유전율 ε, 과 복소투자율 μ, 을 구할 수 있다.

(2) 길이 ! 의 변화에 의한 측정법

개방단락법은 시료의 종단을 단락 하거나 개방하여 재료정수를 구하지만 종 단을 단락한 상태에서 시료의 길이를 변화시켜 구할 수도 있다. 그림 3.7과 같 이 길이를 *l* 또는 2*l*로 종단을 단락한 시료를 준비하여 시료의 전면에서의 정 규화 임피던스를 측정하여 *z*1, *z*2로 한다.

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

$$z_1 = z_c \tanh \gamma \, l \tag{3.70}$$

$$z_2 = z_c \tanh \gamma \, 2l \tag{3.71}$$

여기서 식(3.71)은 tanh 성질을 이용하면

$$z_2 = \frac{2z_2}{1 + \tanh^2 \gamma l} \tag{3.72}$$

이 된다. 따라서 식(3.70)과 (3.72)로부터

$$\tanh\gamma \,l = \sqrt{\frac{2z_{1-}z_{2}}{z_{2}}}\tag{3.73}$$

또 전파정수는

$$\gamma = \frac{1}{l} \tanh^{-1} \sqrt{\frac{2z_{1-}z_{2}}{z_{2}}} \tag{3.74}$$

이 되고 식(3.70)과 (3.73)을 고려하면 특성임피던스는

$$z_c = z_1 \sqrt{\frac{z_2}{2z_1 - z_2}} \tag{3.75}$$

로 구해진다.

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



그림 3.7 길이*l*또는 2*l*로 하는 경우 Fig 3.7 A Case or / or 2/ line

(3) 비자성 재료의 경우

복소유전율 ε_r 과 복소투자율 μ_r 을 구하는 방법으로 개방단락법이나 길이l의 변화에 의한 측정법은 일반적으로 어떠한 재료의 경우에도 사용할 수 있으나 비자성재료인 경우를 보면 μ_r 는 $\mu_r'=1$, $\mu_r''=0$ 으로 진공 중 μ_o 라고 들 수 있 다. 따라서 정규화 임피던스와 전파정수는 식(3.36)과 (3.38)로 부터 $\mu_r=1$ 로 둘 수 있으므로

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

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

로 되어 거리 l에서 정규화 입력 임피던스는

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

이므로 여기서 $z(l), \lambda$, $l \in$ 기지항으로 이 식을 만족하는 e_r 의 값을 정하면 된 다. 오차를 줄이면서 좀더 정확한 값을 얻기 위하여서는 일반적으로 l의 값을 여러 가지로 바꾸면서 그것에 대한 z(l)의 궤적을 측정하고, 식(2.2.25)를 그 궤 적에 가깝게 되도록 e_r 을 정하는 것이 필요하다. (4) 자성재료 μ_r 만의 측정

자성재료에서 시료의 종단을 단락하고 또한 시료의 길이 *l*이 다음 조건을 만족할 정도의 얇은 두께 박막의 경우를 보면 간단히 μ_r을 구할 수 있다.

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

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

로 된다. 여기서 |γ·l| ≪1을 만족시키는l을 정하면 이 조건에서는

$$\tanh \gamma \cdot l \cong \gamma \cdot l \tag{3.80}$$

이 되어 식(3.79)에 대입하면

$$z_s \simeq \sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}} \; j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\varepsilon_r \; \mu_r} \cdot l = \; j \frac{2\pi}{\lambda} \; \mu_r \cdot l \tag{3.81}$$

식(3.81)로부터

$$\mu_r = -j\frac{\lambda}{2\pi l}z_s \tag{3.82}$$

로 μ_r 이 구해진다.

(5) 자성재료에서 8, 만의 측정

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

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

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

$$\coth \gamma \, l = \frac{1}{\gamma \, l} \tag{3.84}$$

이므로 식(3.83)에 대입하여

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

이 되어 \mathcal{E}_r 은

$$\varepsilon_r = -j \frac{\lambda}{2\pi \overline{z_o} \, l} \tag{3.86}$$

로 구할 수 있다[17],[18].

제 4 장 전파흡수체 제작 및 시료의 특성

4.1 옻에 대한 특성분석

본 연구에서 전파흡수체의 지지재(Binder)로 사용된 옻(漆)에 대한 물질적, 화학적 특징을 설명한다. 수액을 의미하는 옻칠은 옻나무 자체까지도 포함하는 의미로 흔히 사용되고 있다. 동양(東洋)의 칠(漆;옻)이라고 알려져 있는 옻칠 (漆)은 동양의 여러 나라 중에서도 중국이 최초로 발견하고 도료로 사용한 민 족으로 보고 있으며, 한국(韓國)에서 옻칠이 언제 유입되어 이용되었는지 정확 하게는 알 수 없으나 한반도에서 발견되는 옻의 흔적으로 보아 청동기 시대말 기인 B.C 3세기경으로 추정하고 있다[19]. 이와 같이 아주 오래전부터 옻은 동 양에서 천연도료로 사용되어 오고 있으며 동의보감과 본초강목에서는 약리적인 효능에 대해서도 설명하고 있다.

4.1.1 옻의 특징

수천년 전부터 한국, 중국, 일본, 스웨덴 등에서 고급 목공예품, 가구, 선박, 악기 등에 천연도료로 사용되어오던 옻칠은 생활도구나 식기에 옻칠을 하면 표 면에 견고한 막이 형성되는데, 이막은 다음과 같은 특징을 갖고 있다.

1. 광택이 뛰어나고 내 구성이 강하여 반영구적이다.

- 2. 온도, 습도, 화공약품에 의하여 변질되지 않는다.
- 3. 살균력이 강하고 좀이나 곰팡이가 생기지 않습니다.
- 4. 인체에 무해하다.

위와 같은 특징을 가장 잘 보여주는 것은 고려팔만대장경(高麗八萬大藏經)과 고구려(高句麗) 고분의 벽화이다. 고려대장경 경판은 그 표면이 옻칠이 되어 있 고 이 옻칠이 경판보존에 크게 기여했을 것으로 믿어진다. 옻칠은 표면을 아름 답게 하는 것뿐만 아니라, 방수, 내화학성이 좋고 다른 도료와는 다르게 방충, 방부 효과도 있어서 옛날부터 우수한 도료로 응용되어 왔다. 그리고 특히 목재 와는 결합력이 강해서 옻칠의 박리가 잘 일어나지 않으므로 오랫동안 옻칠이 유지되어서 목재를 더 오랫동안 보호할 수 있게 된다. 옻칠은 우리나라, 중국, 일본 등 아시아에서는 고대로 부터 가구 등과 나무, 종이, 천, 금속 등의 소형 장식품에 사용되었으나 대장경 경판과 같이 인쇄용 목판에 그것도 방대한 양에 옻칠을 한 것은 매우 드문 경우라 할 것이다[20].

4.1.2 옻의 약리작용

인체에 무해하다는 것은 옻 자체는 독성을 가지고 있어 그 독성이 알러지 (Allergy)를 일으키기도 하지만 독성을 제거한 정재된 옻은 인체에 전혀 무해 할 뿐만 아니라 오히려 상당한 약리작용을 한다. 동의보감과 본초강목에 보면 다음과 같은 옻의 효능이 나타나 있다.

동의보감	본초강목
성질은 따뜻하고(溫) 맛은 매우며(辛)	3시충과 전시채충을 죽인다. 회궐로
독이 있다. 어혈을 삭히며, 산가증(산	생긴 가슴앓이가 낫는다. 9가지 가슴앓
후통)을 낫게한다. 소장(小腸)을 잘	이와 어혈로 가슴이 아픈 것을 치료한
통하게하고 회충을 없애며 뜬뜬한 적	다.
(積)을 헤치고 혈훈을 낫게하며 3층을	
죽인다. 전신노채(전염성 결핵)에도 쓴	
다.	

옻의 효능에 대한 연구와 실험은 끊임없이 진행되고 있으며, 현재까지 밝혀 진 옻의 뛰어난 효능은 아래와 같다.

위암을 포함한 복강내의 종양성 질환, 즉, 위암, 난소나 자궁의 종양등
 냉증이 심하거나 월경불순일 때

3. 술로부터 간을 보호하고 간의 해독작용

4. 남성들의 강장제 (스테미나 강화)
5. 옻의 주성분인 우루시울의 항암작용 (기존 암 치료약 효능의 10배)
6. 뼈에 영양분을 주어 골수염, 관절염에 효능
7. 심장병, 결핵, 신경통, 간병, 늑막염, 간경화
8. 소화불량, 위염, 위궤양, 위암
9. 담당결석이나 신장, 방광결석

4.1.3 옻의 구성성분

옻은 여러 가지 구성성분과 특징을 가지고 있다. 이미 알려진 바와 같이 옻 의 구성성분은 표 4.1에서처럼 우리시올의 함유량이 60~65 %나 되며 그 외에 도 고무질(다당류), 함유질소(단당백), 락카아제(효소), 그리고 물이 각각 소량 함유되어있으며 생산하는 계절과 지역에 따라서 조성이 조금씩 다르다. 구성 성분 중에서 가장 많은 함량을 차지하고 있는 우루시올은 옻의 주성분이 되는 것으로 이것이 많이 함유될수록 훌륭한 옻이라 한다. 그밖에 설탕에 가까운 당 직을 함유하고 있는 고무질은 광택을 더해주는 역할을 하며, 여기에는 경화를 담당하는 효소인 락카아제, 그리고 물과 기름 상에서 분산제 역할을 담당하는 당단백질이 함유되어 있다[21].

표 4.1 생옻(생칠)의 구성 성분

Composition	Concentration(%)	MW(g/mole)
Urushiol	$60 \sim 65$	320
Gummy substance	5~7	22000
Nitrogen compounds	2~3	8000
Laccase	0.2~0.9	120000
Water	25~30	18

Table 4.1 The Composition of Oriental Natural Lacquer.

옻칠을 하면 표면에서 굳어져서 옻의 막이 형성되는데, 이것을 경화라고 한 다. 이 경화 반응은 공기 중에서 일어나는데, 30 ℃ 또는 그 이상에서 80% 정 도의 높은 습도가 유지되어야 좋은 칠막이 생긴다. 옻의 경화는 전기화학적 방 법에 의한 우루시올의 산화의 시작으로 고분자의 가교결합이 생기는 메카니즘, 효소의산화적 결합반응 메카니즘, 그리고 천연 건성유와 같이 곁사슬의 산화에 의한 경화 메카니즘 등으로 설명된다.

4.2 샘플의 제작환경 및 조성비

4.2.1 샘플의 제작환경

앞장에서 설명한 것처럼 옻을 사용한 전파흡수체를 제작하기 위해서는 제작 환경 중에서 특히 온도와 습도 환경이 중요한 환경요인이다. 경화가 잘 일어나 도록 온도는 27 ℃이상 습도는 75 %이상의 환경에서 건조를 하였고 제작은 초 여름부터 초가을까지 실온에서 제작하였다.



그림 4.1 제작된 전파흡수체와 가공된 샘플과 샘플홀더 Fig. 1. Fabricated EM wave absorber and Processed sample

전파흡수체 재료로는 자성손실재료인 MnZn 페라이트, NiZn 페라이트, 두 가 지와 정제되지 않은 순수 생옻과 혼합하여 각각의 전파흡수체를 제작하였으며 옻과 각 페라이트를 10분정도 혼합하여 약 0.2 mm 정도의 두께로 얇게 펴서 바른 다음 건조실에서 일주일가량 충분히 건조를 시킨 다음 같은 방법으로 두 께를 올려서 전파흡수체를 제작하였다.

4.2.2 시료의 조성비

전파흡수체의 제작시 지지재(Binder)와 전파흡수재료(Ferrite)의 조성비에 따 라서 흡수특성이 어떻게 변화하는지를 알아보기 위해서 전파흡수체 샘플 제작 에 사용된 재료(페라이트)와 지지재(옻)의 조성비는 전자저울을 사용하여 다음 의 표와 같은 비율로 제작했다.

표 4.2 전파흡수체 샘플의 조성비

Table 4.2 Mixing rate of sample

	재료(Ferrite)의 비율 wt%	지지재(옻)의 비율 wt%	
MnZn	00 25 20 75 70	10 15 20 25 20	
페라이트	90, 83, 80, 73, 70	10, 15, 20, 25, 50	
NiZn 페라이트	90, 85, 80, 75, 70	10, 15, 20, 25, 30	

실험과정에서 옻의 비율에 따라서 건조시간은 옻의 비율이 높으면 시간이 오 래 걸렸고 상대적으로 옻의 비율이 낮으면 건조시간이 빠르다는 것을 알았다. 작업은 건조시간이 제일 늦은 샘풀이 완전히 건조가 되었을 때 다시 전자저울 에 각각의 페라이트와 옻을 표와 같은 조성비로 혼합해서 제작하는 과정을 약 4개월에 걸쳐서 샘플제작을 완성하였다.

4.3 옻의 흡수능

옻과 페라이트를 혼합한 전파흡수체를 제작하였다. 옻의 특징으로 볼 때 기 존의 지지재와 마찬가지로 옻도 고무성분을 가지고 있어서 페라이트와 혼합하 여 전파흡수체로 제작할 수가 있다. 지지재 자체가 갖고 있는 전자파 흡수능을 조사하기 위하여 각각 5 mm의 CPE와 실리콘 고무, 그리고 옻의 전파흡수능을 측정하고 이를 그림 4.2 ~ 4.4에 나타내었다. 그림에 나타낸 바와 같이 CPE는 흡수능이 거의 없고 실리콘고무 그리고 옻은 10 GHz 부근에서 각각 약 0.3 dB 와 0.8 dB의 전자파 흡수능을 나타내고 있다.



그림 4.2 CPE의 반사계수

Fig. 4.2 Reflection coefficient for CPE.



그림 4.3 실리콘 고무의 반사계수

Fig. 4.3 Reflection coefficient for Silicone rubber.



그림 4.4 옻의 반사계수

Fig. 4.4 Reflection coefficient for Natural lacquer.

지지재를 각각 CPE, Silicone, 그리고 옻으로 하고 여기에 MnZn 페라이트를 혼합하여 3 mm의 두께를 갖는 전파흡수체를 제작한 후 이들의 전자파 흡수능 을 측정하여 그림 4.5, 4.6, 4.7에 나타내었다. 5 dB 이상의 전파흡수능을 나타 내는 주파수는 CPE와 혼합한 것이 1 GHz ~ 4.7 GHz, 실리콘 고무와 혼합한 것이 1 GHz ~ 3GHz, 옻과 혼합한 것이 2 GHz ~ 12 GHz 로 CPE와 실리콘 고무를 사용한 MnZn 페라이트 전파흡수체에 비하여 옻을 지지재로 사용한 전 파흡수체가 광대역에서 우수한 전파 흡수능을 나타냄을 알 수 있다. 또한 각각 의 정합 주파수인 1.8 GHz에서 -10.6 dB, 1.4 GHz에서 -9.8 dB, 10.5 GHz에서 -21.7 dB로 옻을 지지재로 이용한 MnZn 페라이트 전파흡수체가 가장 우수한 전파흡수능을 나타내고 있다.

그림 4.5 ~ 4.7에서 나타낸 것과 같이 3 mm 두께의 전파흡수체에서 기존의 지지재와 혼합한 전파흡수체보다 옻과 혼합한 전파흡수체가 5 dB 이상의 흡수 능을 고려할 때 더 광대역이고 정합주파수에서 더 우수한 흡수능을 가진다는 것을 나타내었고 옻의 특징에서 내구성이 강하여 반영구적이고 온도, 습도, 화 공약품에 변질되지 않으며 살균력이 강하고 좀이나 공팡이가 생기지 않을 뿐만 아니라 인체에 무해함으로 옻을 사용한 전파흡수체는 기존의 지지재로 사용한 전파흡수체보다 더 친환경적인 전파흡수체가 될 것으로 사료된다.



그림 4.5 CPE와 혼합한 전파흡수체의 반사계수 Fig. 4.5 Reflection coefficient of a MnZn ferrite absorber mixed with CPE.



그림 4.6 실리콘 고무와 혼합한 전파흡수체의 반사계수 Fig. 4.6 Reflection coefficient of a MnZn ferrite absorber mixed with silicone rubber.



그림 4.7 옻과 혼합한 전파흡수체의 반사계수 Fig. 4.7 Reflection coefficient of a MnZn ferrite absorber mixed with natural lacquer.
4.4 재료정수 측정

옻을 지지재로 MnZn 페라이트와 NiZn 페라이트를 혼합하여 전파흡수체를 제작하여 유전율과 투자율을 길이 *l*의 변화(*l*, *2l*)에 의한 측정법으로 측정하여 샘플의 조성비에 따라 각각의 재료정수(유전율, 투자율)를 구하였다.

4.4.1 사용된 Sample 및 Sample Holder



Fig. 4.8 Manufactured sample (a) 2 mm and (b) 4 mm.

그림 4.8은 One-Port Method $\ell - 2\ell$ 법을 사용하여 전파흡수체의 전파흡수 능과 재료정수를 측정한 시료의 2 mm, 4 mm 샘플 도면이다. 그림 4.9는 시료 를 측정할 수 있도록 만들어진 샘플홀더의 단면(a)과 위에서 본 평면(b)의 그림 이다. 진하게 칠해져 있는 부분이 샘플이 삽입되는 곳이며, 이 샘플홀더는 Network Analyzer(Wiltron 360B)와의 연결 했을 때 틈이 생기지 않는다.



Fig. 4.9 Sample holder (a)Section and (b)Plane.

4.4.2 재료정수 계산방법

본 논문에서의 전파흡수체 시료의 재료정수계산은 반사손실을 Wiltron 360B를 사용하여 측정하였고, 측정된 반사손실을 이용하여 다음과 같은 방법으 로 계산하였다. 그림 4.10과 4.11에서 보는 것과 같이 Network Analyzer의 Port 와 Sample Holder 사이에 틈이 없이 밀착시키면, Reference Plane에서의 반사계 수 S11(ℓ)은 전체의 반사계수 S11'(ℓ)과 같게 된다. 그러므로 Short Sample의 측정치로 전체 반사계수를 측정할 필요 없이 Sample 길이가 ℓ일 때와 2ℓ일 때의 임피던스만 계산하면 된다. 우선 그림 4.10과 같이 Sample 길이가 ℓ일 때의 임피던스는

$$Z(\ell) = \frac{1 + S_{11}(\ell)}{1 - S_{11}(\ell)}$$
(5.1)

와 같이 구해진다. 그림 4.11과 같이 Sample 길이가 2ℓ일 때의 반사계수 S₁₁ (2ℓ)은 전체의 반사계수 S₁₁(ℓ)과 같게 된다. 그러므로 2ℓ일 때의 임피던스 는 식 (5.2)와 같다.



그림 4.10 샘플의 길이가 ℓ인 샘플홀더 Fig. 4.10 Sample holder with sample length ℓ.







한편 Network Analyzer의 Port와 Sample Holder는 틈이 없이 밀착되므로, 식 (5.1)과 식 (5.2)는

$$Z(\ell) = Z_c \tanh(\gamma \,\ell) \tag{5.3}$$

$$Z(2\ell) = Z_c \tanh(\gamma \ 2\ell) \tag{5.4}$$

와 같이 쓸 수 있다. 식 (5.3)과 식 (5.4)에 하이퍼블릭 탄젠트 공식을 적용하 면,

$$\tanh(\gamma 2\ell) = \frac{2\tanh(\gamma \ell)}{1 + \tanh^2(\gamma \ell)}$$
(5.5)

이 되고, 식 (5.5)을 변형하면

$$Z(2\ell) = \frac{2 \tanh(\gamma \ell)}{1 + \tanh^2(\gamma \ell)}$$
(5.6)

$$\tanh(r\ell) = \sqrt{\frac{2Z(\ell) - Z(2\ell)}{Z(2\ell)}}$$
(5.7)

이 된다. 식 (5.7)로 부터 γ , Z_c 을 도출하면,

$$r = \frac{1}{\ell} \tanh^{-1} \sqrt{\frac{2Z(\ell) - Z(2\ell)}{Z(2\ell)}}$$
(5.8)

$$Z_{c} = Z'(\ell) \sqrt{\frac{Z'(2\ell)}{2Z'(\ell) - Z'(2\ell)}}$$
(5.9)

이 된다. 식 (5.8)과 식 (5.9)을 대입해서 풀면

$$\varepsilon_{\gamma} = -j \frac{C}{2\pi f} \cdot \frac{\frac{1}{l} \tanh^{-1} \sqrt{\frac{2Z(\ell) - Z(2\ell)}{Z(2\ell)}}}{Z(\ell) \sqrt{\frac{2Z(\ell)}{2Z(\ell) - Z(2\ell)}}}$$
(5.10)

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

$$\cdot \frac{1}{l} \tanh^{-1} \sqrt{\frac{2Z(\ell) - Z(2\ell)}{Z(2\ell)}}$$
(5.11)

이 구하여진다. 여기서 구하여진 ε_r, μ_r을 두께 d의 전파흡수체를 판상으로 하 여 금속판 위에 놓은 경우, 평면파의 수직입사에 대한 파동임피던스 z는 진공 중의 평면파 파동임피던스로 정규화한 식 (2.20)에 대입하여 정규화된 임피던스 를 구한다음 식 (2.30)에 대입하여 각 두께에 따른 반사계수를 시뮬레이션 하였 다.

4.4.3 샘플의 조성비에 따른 재료정수 및 반사계수

표 4.2에 나타낸 조성비에 따라 전파흡수체를 제작하고 두께에 따라서 흡수 능이 어떻게 변하는지를 시뮬레이션하기 위해서 조성비별로 샘플의 두께를 2 mm와 4 mm로 해서 길이변화에 의한 측정법으로 측정하여 MatLab으로 재료 정수(유전율, 투자율)을 계산하여 그림 4.12 ~ 그림 4.31에 나타내었다. 조성비 는 MnZn 페라이트와 NiZn 페라이트를 각각 90, 85, 80, 75, 70 wt%로 옻을 10, 15, 20, 25, 30 wt%의 조성비로 5 wt% 단위로 변화시키면서 전파흡수체를 제작하였다.

그 결과 같은 재료를 가지고 전파흡수체를 만들어도 전파흡수체의 조성비를 달리하면 유전율과 투자율이 각각 다르다는 것을 알 수 있고 MnZn 페라이트 와 옻을 혼합한 전파흡수체의 경우 옻의 혼합비율이 커질수록 투자율의 실수부 가 작아졌고 자성손실계수 tanδ=1인 영역이 고주파대로 이동하였다. 그림 4.12와 그림 4.13은 MnZn 페라이트 : 옻 = 90 wt% : 10 wt% 인 전파 흡수체의 유전율과 투자율을 나타낸다.



Fig. 4.12 Complex permeability (MnZn : Natural Lacquer = 90 : 10 wt%)



그림 4.13 MnZn : 옻 = 90 : 10 일 때의 유전율 Fig. 4.13 Complex permittivity (MnZn : Natural Lacquer = 90 : 10 wt%)

그림 4.14와 그림 4.15은 MnZn 페라이트 : 옻 = 85 wt% : 15 wt% 일 때의 전 파흡수체의 유전율과 투자율을 나타낸다.



(MnZn : Natural Lacquer = 85 : 15 wt%)



그림 4.15 MnZn : 옻 = 85 : 15 일 때의 유전율 Fig. 4.15 Complex permittivity (MnZn : Natural Lacquer = 85 : 15 wt%)

그림 4.16와 그림 4.17은 MnZn 페라이트 : 옻 = 80 wt% : 20 wt% 일 때의 전 파흡수체의 유전율과 투자율을 나타낸다.



Fig. 4.16 Complex permeability (MnZn : Natural Lacquer = 80 : 20 wt%)



그림 4.17 MnZn : 옻 = 80 : 20 일 때의 유전율 Fig. 4.17 Complex permittivity (MnZn : Natural Lacquer = 80 : 20 wt%)

그림 4.18와 그림 4.19은 MnZn 페라이트 : 옻 = 75 wt% : 25 wt% 일 때의 전 파흡수체의 유전율과 투자율을 나타낸다.



그림 4.18 MnZn : 옻 = 75 : 25 일 때의 투자율 Fig. 4.18 Complex permeability (MnZn : Natural Lacquer = 75 : 25 wt%)



그림 4.19 MnZn : 옻 = 75 : 25 일때의 유전율 Fig. 4.19 Complex permittivity (MnZn : Natural Lacquer = 75 : 25 wt%)

그림 4.20와 그림 4.21은 MnZn 페라이트 : 옻 = 70 wt% : 30 wt% 일 때의 전파흡수체의 유전율과 투자율을 나타낸다.





그림 4.21 MnZn : 옻 = 70 : 30 일 때의 유전율 Fig. 4.21 Complex permittivity (MnZn : Natural Lacquer = 70 : 30 wt%)

다음은 NiZn 페라이트와 옻을 혼합한 전파흡수체의 유전율과 투자율을 계산 하여 그림 4.22 ~ 그림 4.31에 나타내었다. 그림 4.22와 그림 4.23은 NiZn 페라 이트 : 옻 = 90 wt% : 10 wt% 인 전파흡수체의 유전율과 투자율을 나타낸다.







그림 4.23 NiZn : 옻 = 90 : 10 일 때의 유전율 Fig. 4.23 Complex permittivity (NiZn : Natural Lacquer = 90 : 10 wt%)

- 74 -

그림 4.24와 그림 4.25는 NiZn 페라이트 : 옻 = 85 wt% : 15 wt% 인 전파 흡수체의 유전율과 투자율을 나타낸다.







그림 4.25 NiZn : 옻 = 85 : 15 일 때의 유전율 Fig. 4.25 Complex permittivity (NiZn : Natural Lacquer = 85 : 15 wt%)

그림 4.26과 그림 4.27은 NiZn 페라이트 : 옻 = 80 wt% : 20 wt% 인 전파 흡수체의 유전율과 투자율을 나타낸다.







그림 4.27 NiZn : 옻 = 80 : 20 일 때의 유전율 Fig. 4.27 Complex permittivity (NiZn : Natural Lacquer = 80 : 20 wt%)

그림 4.28와 그림 4.29는 NiZn 페라이트 : 옻 = 75 wt% : 25 wt% 인 전파 흡수체의 유전율과 투자율을 나타낸다.



Fig. 4.29 Complex permittivity (NiZn : Natural Lacquer = 75 : 25 wt%)

그림 4.30와 그림 4.31은 NiZn 페라이트 : 옻 = 70 wt% : 30 wt% 인 전파 흡수체의 유전율과 투자율을 나타낸다.



Fig. 4.30 Complex permeability (NiZn : Natural Lacquer = 70 : 30 wt%)



그림 4.31 NiZn : 옻 = 70 : 30 일 때의 유전율 Fig. 4.31 Complex permittivity (NiZn : Natural Lacquer = 70 : 30 wt%)

제 5 장 시뮬레이션 및 측정 결과

옻을 지지재로 사용한 전파흡수체를 제작했을 때 두께에 따라서 전파흡수특 성이 어떻게 변하는지를 파악하기 위하여 MatLab을 이용하여 재료정수(유전율 : ε_r, 투자율 : μ_r)를 구한 다음 두께에 따라서 흡수능의 변화를 시뮬레이션하고 그 결과를 실제 측정치와 비교 하였다.

시뮬레이션은 *l*, 2*l* 로 *z*₁, *z*₂를 구하고 이것을 식 (3.75)에 대입해서 *z*_c를 구 할 수 있으며, 식 (3.74)에서 *z*₁, *z*₂로 γ 를 구할 수 있다. 구해진 γ 를 가지고 식 (3.68)과 식(3.69)에서 *ε*_r, *μ*_r을 식 (3.42)에 대입하여 *z*_{in}을 구하고 이것을 식 (3.48)에 대입해서 반사계수 Γ 를 구할 수 있다. 식 (3.42)의 *d*를 변화시켜 가면 서 시뮬레이션 하였다.

$$z_c = z_1 \sqrt{\frac{z_2}{2z_1 - z_2}} \tag{3.75}$$

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

$$\varepsilon_r = -j\frac{\lambda}{2\pi} \cdot \frac{\gamma}{z_c} \tag{3.68}$$

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

$$z_{in} = \sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}} \tanh\left(j\frac{2\pi}{\lambda}\varepsilon_r\,\mu_r\right)d\tag{3.42}$$

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

5.1 단층일 경우

앞에서 구해진 재료정수(ε_r, μ_r)을 이용하여 조성비 별로 두께에 따라서 어 떻게 변하는지를 시뮬레이션하고 시뮬레이션 결과를 그림 5.1 ~ 그림 5.8에 나 타내었다. 실제 측정한 측정치는 그림 5.9 ~ 그림 5.16에 나타내었으며 시뮬레 이션 값과 실측치를 비교한 것은 그림 5.17 ~ 그림 5.24에 나타내었다. 각각의 조성비는 MnZn 페라이트 : 옻 = 90 wt% : 10 wt%, MnZn 페라이트 : 옻 = 70 wt% : 30 wt%, NiZn 페라이트 : 옻 = 90 wt% : 10 wt%, 그리고 NiZn 페 라이트 : 옻 = 70 wt% : 30 wt%이고 두께는 1 mm ~ 6 mm 를 그림으로 나 타내었다.

5.1.1 시뮬레이션 결과

그림 5.1과 그림 5.2는 조성비가 MnZn 페라이트 : 옻 = 90 wt% : 10 wt% 이고, 두께가 1 mm ~ 6 mm 일 때 전파흡수능의 변화를 시뮬레이션 한 것이 다.



그림 5.1 시뮬레이션 결과(두께 1 ~ 3 mm) Fig. 5.1 Calculated result(Thickness : 1 ~ 3 mm)



그림 5.2 시뮬레이션 결과(두께 4 ~ 6 mm) Fig. 5.2 Calculated result(Thickness : 4 ~ 6 mm)

그림 5.3과 그림 5.4는 조성비가 MnZn 페라이트 : 옻 = 70 wt% : 30 wt% 이고, 두께가 1 mm ~ 6 mm 일 때 전파흡수능의 변화를 시뮬레이션 한 것이 다.



Fig. 5.3 Calculated result(Thickness : $1 \sim 3 \text{ mm}$)



그림 5.4 시뮬레이션 결과(두께 4 ~ 6 mm) Fig. 5.4 Calculated result(Thickness : 4 ~ 6 mm)

그림 5.5와 그림 5.6은 조성비가 NiZn 페라이트 : 옻 = 90 wt% : 10 wt% 이고, 두께가 1 mm ~ 6 mm까지 전파흡수능의 변화를 시뮬레이션 한 것이다.



Fig. 5.5 Calculated result(Thickness : $1 \sim 3 \text{ mm}$)



Fig. 5.6 Calculated result(Thickness : $4 \sim 6$ mm)

그림 5.7과 그림 5.8은 조성비가 NiZn 페라이트 : 옻 = 70 wt% : 30 wt% 이고, 두께가 1 mm ~ 6 mm까지 전파흡수능의 변화를 시뮬레이션 한 것이다.



Fig. 5.7 Calculated result(Thickness : $1 \sim 3 \text{ mm}$)



Fig. 5.8 Calculated result(Thickness : $4 \sim 6 \text{ mm}$)

5.1.2 실측정 결과

시뮬레이션과 비교하기 위해서 MnZn 페라이트와 NiZn 페라이트에 옻을 전 자저울로 표 4.2에 나타낸 조성비로 전파흡수체를 제작하여 전파흡수능을 측정 한 결과를 그림 5.9 ~ 5.16에 나타내었다.



그림 5.10 실측치(두께 4 ~ 6 mm) Fig. 5.10 Measured result(Thickness : 4 ~ 6 mm)

그림 5.11과 5.12는 조성비가 MnZn 페라이트 : 옻 = 70 wt% : 30 wt% 이 고, 두께가 1 mm ~ 6 mm 일 때 각 전파흡수체의 전파흡수능을 나타낸 것이 다.



그림 5.11 실측치(두께 1 ~ 3 mm)

Fig. 5.11 Measured result(Thickness : $1 \sim 3 \text{ mm}$)



Fig. 5.12 Measured result(Thickness : $4 \sim 6 \text{ mm}$)

그림 5.13과 5.14는 조성비가 NiZn 페라이트 : 옻 = 90 wt% : 10 wt% 이 고, 두께가 1 mm ~ 6 mm 일 때 각 전파흡수체의 전파흡수능을 나타낸 것이 다.



Fig. 5.13 Measured result(Thickness : $1 \sim 3 \text{ mm}$)



Fig. 5.14 Measured result(Thickness : $4 \sim 6 \text{ mm}$)

그림 5.15와 5.16은 조성비가 NiZn 페라이트 : 옻 = 70 wt% : 30 wt% 이 고, 두께가 1 mm ~ 6 mm 일 때 각 전파흡수체의 전파흡수능을 나타낸 것이 다.



Fig. 5.15 Measured result(Thickness : $1 \sim 3 \text{ mm}$)



Fig. 5.16 Measured result(Thickness : $4 \sim 6 \text{ mm}$)

친환경적인 지지재인 옻을 사용해서 다양한 조성비와 두께에 따른 전파흡수 능을 측정하였다. MnZn 페라이트 전파흡수체의 경우에는 규칙적으로 두께가 두꺼워지면 정합주파수가 낮은 주파수대로 이동하지만 NiZn 페라이트 전파흡 수체의 경우에는 정합주파수가 높은 주파수대로 올라가는 것을 확인할 수 있었 다.

5.1.3 시뮬레이션 값과 실측치 비교

전파흡수체의 조성비와 두께에 따른 전파흡수능의 변화를 시뮬레이션한 결 과와 시뮬레이션에 의해 실제로 제작한 전파흡수체의 전파흡수능을 측정하여 각각 그림 5.17과 그림 5.18에 나타내었다.

그림 5.17은 조성비가 MnZn 페라이트 : 옻 = 90 wt% : 10 wt%이고 두께 가 1 mm ~ 3 mm 이며 그림 5.18은 조성비가 MnZn 페라이트 : 옻 = 70 wt% : 30 wt%을 나타낸 것이다

두께가 1 mm, 3 mm, 5 mm의 경우 일부 고주파 영역(12 GHz 이상)을 제외 하고 MnZn 페라이트와 옻의 조성비가 90 wt% : 10 wt%와 70 wt% : 30 wt% 일 때 모두 시뮬레이션 값과 실측치 잘 일치하는 것을 확인하였다.



그림 5.17 시뮬레이션 값과 측정값의 비교

Fig. 5.17 Comparison of reflection coefficient by Calculated and measured values.



그림 5.18 시뮬레이션 값과 측정값의 비교

Fig. 5.18 Comparison of reflection coefficient by Calculated and measured values.

다음은 조성비가 MnZn 페라이트 : 옻 = 70 wt% : 30 wt% 이고 두께가 1 mm ~ 3 mm 일 때의 전파흡수능을 그림 5.19에, 두께가 4 mm ~ 6 mm일 때의 전파흡수능을 그림 5.20에 나타내었다.



Fig. 5.19 Comparison of reflection coefficient by Calculated and measured values.



그림 5.20 시뮬레이션 값과 측정값의 비교

Fig. 5.20 Comparison of reflection coefficient by Calculated and measured values.

다음은 조성비가 NiZn 페라이트 : 옻 = 90 wt% : 10 wt% 이고 두께가 1 mm ~ 3 mm 일 때의 전파흡수능을 그림 5.21에 두께가 4 mm ~ 6 mm 일 때의 전파흡수능을 그림 5.22에 나타내었다.

NiZn 페라이트와 옻의 조성비가 90 wt% : 10 wt% 일 때의 두께 6 mm와 조성비가 70 wt% : 30 wt% 일 때의 5 mm, 6 mm의 3 GHz 이하의 일부 주 파수 영역을 제외하고 조성비가 90 wt% : 10 wt%와 70 wt% : 30 wt% 일 때 모두가 잘 일치하는 것을 확인 하였다.



Fig. 5.21 Comparison of reflection coefficient by Calculated and measured values.



그림 5.22 시뮬레이션 값과 측정값의 비교

Fig. 5.22 Comparison of reflection coefficient by Calculated and measured values.

다음은 NiZn 페라이트 : 옻 = 70 wt% : 30 wt% 이고 두께가 1 mm ~ 3 mm까지를 그림 5.23에 4 mm ~ 6 mm까지를 그림 5.24에 시뮬레이션 값과 실제측정 값을 나타내었다.



Fig. 5.23 Comparison of reflection coefficient by Calculated and measured values.



그림 5.24 시뮬레이션 값과 측정값의 비교

Fig. 5.24 Comparison of reflection coefficient by Calculated and measured values.

그림 5.17부터 그림 5.24까지 나타낸 것을 보면 단층의 경우에 유전율과 투 자율만 알고 있으면 원하는 두께의 흡수능을 시뮬레이션을 통해서 미리추정 할 수 있다는 것을 알 수 있다.

5.2 다층일 경우

Sheet형과 타일형 페라이트 전파흡수체를 흡수대역을 광대역화 하기위해서 다층으로 적층을 하는 경우에 재료정수(ε_r, μ_r)를 가지고 적층의 순서에 따라서 전파흡수능이 어떻게 변하고 각층의 전파흡수체의 두께에 따라서 어떻게 변하 는지를 시뮬레이션하고 실제측정치와 비교 분석하였다. 옻을 사용한 MnZn 페 라이트 전파흡수체와 NiZn 페라이트 전파흡수체를 다층으로 구성하고자 할 때 전파흡수 특성은 어떻게 변하는지를 재료정수(ε_r, μ_r)만 가지고 시뮬레이션을 하였다.

단층형과 같은 방법으로 각 층의 z_n 을 구하고 식 (2.36)에 대입해서 반사계 수를 구한다.

$$Z_{n} = \sqrt{\frac{\mu_{rn}}{\varepsilon_{rn}}} \frac{Z_{n-1} + \sqrt{\frac{\mu_{rn}}{\varepsilon_{rn}}} \tanh\left(j\frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{\mu_{rn}\varepsilon_{rn}}d_{n}\right)}{\sqrt{\frac{\mu_{rn}}{\varepsilon_{rn}}} + Z_{n-1} \tanh\left(j\frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{\mu_{rn}\varepsilon_{rn}}d_{n}\right)}$$
(2.36)

5.2.1 시뮬레이션 결과

전파흡수체를 광대역화 하기 위해서 재료정수가 서로 다른 전파흡수를 적층 하여 다층형 전파흡수체를 제작할 때 적층의 순서에 따라서 전파흡수능이 많이 달라진다. 따라서 적층의 순서를 결정하기 위해서 시뮬레이션을 하고 결정된 순서로 적층형 광대역 전파흡수체를 시뮬레이션 하였다.

그림 5.25는 전파흡수체는 조성비가 MnZn 페라이트 : 옻 = 90 wt% : 10 wt%와 NiZn 페라이트 : 옻 = 90 wt% : 10 wt% 이고 두께는 4, 6, 8 mm 이다. 금속판을 기준으로 NiZn 페라이트 전파흡수체를 먼저 적층 시킨 것이 그림 5.25의 (a)이고 MnZn 페라이트 전파흡수체를 먼저 적층 시킨 것이 그림 (b)이다. 그림 5.25 (a)에서와 같이 NiZn 페라이트 전파흡수체를 먼저 적층했을 때 전파흡수능이 5 dB 이상인 주파수영역은 두께가 4 mm일 때 약 1 GHz ~ 8.5 GHz 이고 두께가 두꺼워 지면 대역폭은 더 좁아지는 것을 확인할 수 있다. 그리나 그림 (b)에서와 같이 MnZn 페라이트 전파흡수체를 먼저 적층했을 때 전파흡수능이 5 dB 이상인 영역은 두께가 4 mm일 때 약 2 GHz ~ 13 GHz 까지 이고 두께가 두꺼워 져도 대역폭이 크게 변하지 않는 것을 확인 할 수 있다. 다라서 금속판을 기준으로 MnZn 페라이트와 옻을 혼합한 전파흡수체를 먼저 적층하는 것이 더 광대역 특성을 가진다는 것을 확인하였다.





Fig. 5.25 Calculated values for determination of two-layer order.

그림 5.26는 금속판을 기준으로 첫 번째 MnZn 페라이트 전파흡수체가 오고 다음으로 NiZn 페라이트가 두께를 1 mm ~ 6 mm까지 변화를 주면서 적층시 키는 경우를 시뮬레이션 하여 그 결과를 그림 5.26의 (a)와 (b)에 나타내었다. 시뮬레이션에 사용된 전파흡수체의 조성비는 MnZn 페라이트 : 옻 = 90 wt% : 10 wt% 와 NiZn 페라이트 : 옻 = 90 wt% : 10 wt%이다.





그림 5.26 2층형 전파흡수체의 시뮬레이션(두께 3 ~ 8 mm) Fig. 5.26 Calculated values of two-layer absorber(Thickness : 3 ~ 8 mm).

5.2.2 실측정 결과

시뮬레이션에 의해 결정된 적층의 순서에 맞추어 두께를 3 mm ~ 8 mm로 전파흡수체를 제작하고 전파흡수능을 측정하여 그림 5.27에 나타내었다.



(a) Thickness : 3, 4, 5 mm



(b) Thickness : 6, 7, 8 mm 그림 5.27 2층형 전파흡수체의 실측치(두께 : 3 ~ 8 mm)

Fig. 5.27 Measured values of two-layer absorber(Thickness: 3 \sim 8 mm)
5.2.3 시뮬레이션 값과 실측치 비교

금속판을 기준으로 옻을 사용한 MnZn 페라이트 전파흡수체 2 mm를 먼저 적층하고 NiZn 페라이트를 다음으로 두께를 1 mm ~ 6 mm 까지 적층하여 측정했고 이것을 그림 5.28 ~ 그림 5.32에 나타냈다.



그림 5.29 결과 계산 값과 측정값(두께 : 3 mm)

Fig. 5.28 Comparison of reflection coefficient by Calculated and measured values.



그림 5.30 결과 계산 값과 측정값(두께 : 4 mm)

Fig. 5.29 Comparison of reflection coefficient by Calculated and measured values.

두께가 3 mm 일 때 12.5 GHz ~ 13.5 GHz , 4 mm 일 때 12 GHz ~ 13 GHz 주파수대역과 3 GHz 이하의 저주파대역에서 약간의 오차를 제외하고는 시뮬레이션 값과 실측치가 잘 일치하는 것을 확인 하였다.



그림 5.31 결과 계산 값과 측정값(두께 : 5 mm)

Fig. 5.30 Comparison of reflection coefficient by Calculated and measured values.



그림 5.32 결과 계산 값과 측정값(두께 : 6 mm)

Fig. 5.31 Comparison of reflection coefficient by Calculated and measured values.



그림 5.32 결과 계산 값과 측정값(두께 : 7 mm) Fig. 5.32 Comparison of reflection coefficient by Calculated and measured values.



그림 5.33 결과 계산 값과 측정값(두께 : 8 mm) Fig. 5.33 Comparison of reflection coefficient by Calculated and measured values.

옻을 사용한 MnZn 페라이트 전파흡수체와 NiZn 페라이트 전파흡수체의 재 료정수를 이용해서 광대역화를 위해 적층을 했을 때 어떻게 변하는지를 시뮬레 이션하고 실측치와 비교해본 결과 8 mm 일 때를 제외하고 나머지는 유사한 값을 예측할 수가 있었다. MnZn 페라이트 2 mm NiZn 페라이트가 6 mm일 때 0.5 GHz ~ 15 GHz 영역에서 10 dB 이상의 흡수능을 가지는 것을 확인했다.

제 6 장 결론

전파흡수체의 광대역화를 위해서 기존에는 Sheet형이나 타일형의 한계를 극 복하기위해서 페라이트 전파흡수체의 형상을 공간적으로 변화시킴으로써 광대 역 페라이트 전파흡수체를 제작해 오고 있다. 그러나 전파흡수체의 형상을 변 화시키는 것은 설계하기 힘들 뿐만 아니라 해석하기도 어렵고 Sheet형이나 타 일형에 비해 비용도 많이 든다. 한편 전파흡수체의 광대역화를 위해서 Sheet형 이나 타일형 전파흡수체를 다층형으로 구성하는 연구가 진행이 되어왔다.

본 논문에서는 전파흡수체의 지지재(Binder)로 전통공예에 사용되어오던 옻 을 새롭게 제안하고 기존에 지지재로 사용되어오던 CPE, 실리콘 고무와 비교 해 볼 때 순수지지재가 가지는 전파흡수능이 더 좋다는 것을 확인하였고 MnZn 페라이트와 CPE, 실리콘 고무, 옻을 각각 혼합하여 전파흡수체를 제작 하여 전파흡수능을 비교해 본 결과 옻을 지지재로 사용했을 때 전파흡수능이 더 좋고 보다 친환경적인 전파흡수체를 개발할 수 있다는 것을 확인하였다. 그 리고 오랜 세월에 걸쳐 옻의 주사용 분야가 도료로 사용 되어왔기에 옻을 이용 해서 인체에 무해한 페인트형 전파흡수체 개발도 가능할 것이라 본다.

옻을 지지재로 하여 MnZn 페라이트와 NiZn 페라이트 각각 5가지 조성비로 전파흡수체를 샘플을 제작하여 재료정수를 구하고 구해진 재료정수를 가지고 조성비별로 단층형인 경우에 전파흡수체의 두께에 따라서 전파흡수능이 어떻게 변하는지 시뮬레이션한 결과와 실제측정 결과를 비교해 본 결과 단층형인 경우 에는 실제측정치와 잘 일치하는 것을 확인했다. 따라서, 단층형 전파흡수체를 제작하는 경우에 재료정수를 알고 있으면 두께에 따른 정합주파수를 전파흡수 체를 제작하지 않고도 쉽게 찾을 수 있을 것이다.

옻을 지지재로 사용한 MnZn 페라이트 전파흡수체와 NiZn 페라이트 전파흡 수체 두층을 적층하기 위해서 시뮬레이션 하여 적층의 순서를 결정하였다. 결 정된 적층의 순서에 따라 실제 전파흡수체를 제작해서 측정 한 결과 금속판을 기준으로 MnZn 페라이트 전파흡수체를 두께를 2 mm로 두고 NiZn 페라이트 를 적층해 나갔을 NiZn 페라이트를 3 mm ~ 6 mm일 때 전파흡수능이 10 dB 이상인 주파수대는 2 ~ 10 GHz까지이고 전파흡수능이 15 dB이상인 주파수대 는 5, 6 mm를 적층했을 때 3 ~ 9 GHz 까지 인 것을 확인하였다. 특히 NiZn 페라이트를 6 mm로 적층했을 때 0.5 GHz ~ 15 GHz 주파수대역에서 10 dB 이상의 전파흡수능을 가진다는 것을 확인했다.

Sheet형과 타일형 페라이트 전파흡수체의 광대역화를 위해서 적층을 하게 되면 단층형 일 때는 두께만의 요인을 고려해서 시뮬레이션 했지만 적층형이 되면 두께뿐만이 아니라 적층의 순서도 상당히 중요한 요인이 된다. 따라서 다 층형 전파흡수체를 제작하기 전에 본 논문에서 제안된 시뮬레이션 방법을 통해 서 각 층을 구성할 전파흡수체의 두께에 따른 전파흡수능을 계산하고 적층의 순서를 결정하여 전파흡수체를 제작한다면 많은 시간과 비용을 줄일 수 있을 것이라 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] 김동일, 전상엽, "EMI/EMC 대책용 광대역화 전파흡수체의 개발에 관한 연 구," 한국항해학회지 제15권, 제4호, pp.13-35, 1991, 12.
- [2] 강덕근,"새로운 전자파장해관련 기준 제/개정", 전파진흥지, pp.11-16, 1996. 11.
- [3] C, L. Holloway and E. F. Kuester, "A low-frequency model for wedge or pyramid absorber arrays-II : Computed and measured results", IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, Vol. 36, No.4, Nov. 1994.
- [4] 김동일, 김민석, 정세모 "전파무향실의 평가에 관한 연구", 한국항해학회지 제19권 제1호, pp.9-16, 1995.
- [5] 김동일, 이창우, 전상엽, 정세모, "초광대역특성을 갖는 정방형 페라이트 기 둥구조의 전파흡수체 설계법",한국항해학회지 제19권 제2호, pp.99-106, 1995.
- [6] 김동일, 박지용, "광대역특성을 갖는 다층구조 페라이트 전파흡수체의 최적 설계",한국통신학회 부산·경남추계합동학술발표회, pp.58-62, 1996.
- [7] 김동일, 박종구, 원영수, 이영구, 정세모, "원추절단형 및 원기둥형 광대역 페라이트 전파흡수체 개발에 관한 연구", 한국전자파학회논문지, 제11권, 제 6호, pp.721-725,2000. 11.
- [8] Y. Naito et al., "Characteristics of grid ferrite electromagnetic wave Absorber", IEICE of Japan, vol. J76-B-II, No.11, pp. 898-905, Nov. 1993.

- [9] 김동일, 김민석, 정세모 "전파반무향실의 평가에 관한 연구", 한국항해학회 지 제19권 제1호, pp.9-16, 1995.
- [10] 김동일, 김민석, 정세모, "전파반무향실의 특성평가에 관한 연구", 한국항해 학회 '96 춘계 학술 발표회 논문집, pp.93-100, 1996.
- [11] 김동일, 김동철, "전파흡수체의 특성측정기법 및 설계 제작에 관한 연구" 한 국항해학회지, 제16권 제4호 pp.35-44, 1992. 12.
- [12] 김동일, 전파흡수체공학, 다솜출판사, 2005.
- [13] Y. Naito et al., "Anechoic chamber fitted with ferrite grid or ferrite multilayer electromagnetic wave absorbers," EMC'94 ROMA, pp.229-234, Sep. 1994.
- [14] 김동일, 정세모, 안영섭, "전파흡수체의 전자파적 특성측정기법 연구" 한국 항해학회지, 제 16 권 제 4 호 pp.25-34, 1992, 12.
- [15] 위탁기술개발과제 최종결과보고서, "초광대역 페라이트 전파흡수체의 설계 기술 개발," 동국산업주식회사, pp.14-17, 2001. 4.
- [16] "電磁波の吸收と遮蔽", 日經技術圖書(株), pp.129-142, 1989.1.10.
- [17] 內藤喜之, "電波吸收体", OHM社, 1987.
- [18] 橋本 修"電波吸收体入門,"森北出版株式會社, pp.20-25, 1997.
- [19] 鄭解朝, "한국의 칠도입과 활용에 관한 연구" 韓國工藝論叢, Vol.1 No.-, pp.257-273, 1998.

- [20] 도춘호, 이태녕, "고려팔만대장경 경판의 옻칠" 보존과학회지, 제 8 권, 1
 호, ISSN 1225-5459, 1999.
- [21] 유정아, 김현경, 홍진후, 박미영, "아크릴모노머에의해개질된옻칠의표면물 성및경화과정에관한연구"공업화학회지, Vol.12 No.4, pp.444-448, 2001.

본 논문 관련 게재, 발표 논문 및 참여 프로젝트

I. 국내 학술지 게재논문

- [1] 김동일, 최동한, 박우근, 송재만 "NC와 옻칠을 소재로 한 고성능 전파흡수체
 에 관한 연구", 한국항해항만학회지, Vol. 27, No. 1, pp. 75-79, 2003. 03.
- [2] 김동일, 최동한, 김수정, 박우근, 송재만, 김민정 "옻을 지지재로 이용한 복 합형 전자파 흡수체의 제작", 한국전자파학회지, Vol. 14, No. 7, pp. 6-761, 2003. 07.
- [3] 김동일, 최동한 "옻을 지지재로 이용한 전자파 흡수체의 흡수 특성 분석",
 한국해양대학교 산업기술연구소 연구논문집, Vol. 21, pp. 91-97, 2004. 01.
- [4] Dong Il Kim, June Young Son, Woo Keun Park, Dong Han Choi "Broad-Band Design of Ferrite One-body EM Wave Absorbers for an Anechoic Chamber," Journal of the Korea Electromagnetic Engineering Society, Vol. 4, No. 2, pp. 51–55, June, 2004.
- [5] 김동일, 최정현, 최동한, 정재현, 김기만 "옻을 지지재로 사용한 페인트형 MnZn와 NiZn 페라이트 전자파 흡수체 특성의 비교연구", 해사산업연구소 논문집, 제 15권, pp. 61-68, 2004. 9.
- [6] 김동일, 최동한, 김기만 "옻의 특징과 옻을 지지재로 사용한 전자파 흡 수체의 두께에 따른 전파흡수 특성 분석", 한국항해항만학회지, 제 28 권 제 10호, pp. 861-867, 2004. 12.

II. 국제 학술지 게재

[1] Dong-Han Choi and Dong Il Kim, Jae-Man Song "Dependence of Electromagnetic Wave Absorption Properties on Binders," Journal of the Korean Physical Society, Vol. 42, No. 6, pp. 799-802, June, 2003 (SCI).

III. 국제 학술회의 발표논문

- [1] D. I. Kim, Y. S. Weon, J. Y. Son, J. M. Song, and D. H. Choi "Design and Fabrication of Broad-Band EM wave absorber in New type for Anechoic Chamber," 2002 Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings, Kyoto International Conference Hall, Japan, pp. 893-896, Nov. 19-22, 2002.
- [2] Dong Il Kim, Dong-Han Choi, Jae-Man Song "Development of EM wave absorbers using a natural lacquer and a NC ferrite," The 1st International Symposium on Electromagnetic Environment Technology, Chungnam National University, Daejeon, Korea, pp. 23–27, June, 3. 2003.
- [3] Dong Il Kim, Dong Han Choi, Jae-Man Song "Dependence of Electromagnetic Wave Absorption Characteristics on Binders," 2003 Asia-Pacific Microwave Conference, Sheraton Walkerhill Hotel, Seoul, Korea, Vol. 03, pp. 1879–1883, Nov. 4–7, 2003.

IV. 국내 학술회의 발표논문

- [1] 김동일, 최동한, 구동우, 김도연, 옥승민, 양은정, 김보영 "옻칠을 소재로 한 고성능 전파흡수체의 개발에 관한 연구", 한국항해항만학회 2002년도 춘 계학술대회 논문집, 제 26권 pp. 53-57, 2002. 03. 29.
- [2] 김동일, 최동한, 구동우, 김도연, 옥승민, 양은정, 김보영 "옻칠을 소재로 한 고성능 전파흡수체의 개발에 관한 연구", 2002년 제3회 산업기술연구소 학술강연회 논문집, pp. 20-26, 2002. 06. 11..
- [3] 김동일, 김보영, 손준영, 최동한, 원영수 "임의 형상 전파흡수체의 전파흡수
 특성 측정 시스템의 개발", 2002년 제3회 산업기술연구소 학술강연회 논
 문집, pp. 40-51, 2002. 06. 11.
- [4] 김동일, 최동한, 김수정, 박우근, 송재만, 김민정 "옻칠을 지지재로 이용한
 복합형 전파흡수체의 제작", 2003년 제1회 산업기술연구소 학술강연회 논
 문집, pp. 123-128, 2003. 4. 24.
- [5] 김동일, 김도연, 양은정, 최동한, 옥승민, 예병덕 "광대역 EMC 필터의 설계
 와 제작에 관한 연구", 2003년 제1회 산업기술연구소 학술강연회 논문집,
 pp. 129-135, 2003. 4. 24.
- [6] 김동일, 최동한, 옥승민 "옻을 지지재로 이용한 전파흡수체의 제작", 2003
 년도 한국전자파학회 전자파기술 하계학술대회 논문집, pp. 99-102, 2003.
 6. 28.
- [7] 신승재, 문상현, 김동일, 송재만, 김기만, 최동한 "Alnico magnets를 이용한 전 파흡수체의 개발", 2004년도 한국항해항만학회 춘계학술대회 논문집, Vol. 28 No. 1, pp. 23-27, 2004. 4. 23-24.

- [8] 최동한, 김동일, 김기만 "옻의 특징과 옻을 지지재로 사용한 전자파 흡수체의 두께에 따른 흡수 특성 분석", 2004년도 한국항해항만학회 춘계 학술대회 논문집, Vol. 28 No. 1, pp. 29-34, 2004. 4. 23-24.
- [9] 최동한, 김동일, 최정현, 김기만 "옻을 지지재로 사용한 페인트형 MnZn 페라이트와 NiZn 페라이트 전자파 흡수체 특성의 비교 연구", 2004년도 제 1회 산업 기술연구소 학술강연회 논문집, pp. 11-18, 2004. 8. 3.
- [10] 김동일, 최동한, 김기만, 정재현, 최정현 "옻을 지지재로 사용한 MnZn와 NiZn 페라이트 전자파 흡수체 특성의 비교연구", 2004년도 추 계 마이크로파 및 전파학술대회 논문집, pp. 460-463, 2004. 9. 18.
- [11] 김동일, 최동한, 김기만, 김대훈 "옻을 지지재로 사용한 적층형 전파흡수체 에 관한 연구", 2005년도 제 1회 산업기술연구소 학술강연회 논문집, pp. 19-26, 2005. 3. 29.
- [12] 최동한, 김동일 "옻을 지지재로 사용한 적층형 전파흡수체에 관한 연구",
 2005년도 마이크로파 및 전파전파 학술대회 논문집, Vol. 28, No. 1, pp.
 419-422, 2005. 5. 21.

V. 참여프로젝트

[1] 중점연구소지원사업(학술진흥재단) 2002년 10월 01일 ~ 2006년 09월 30일
[2] 산학연공동기술개발컨소시엄 사업 2004년 05월 01일 ~ 2005년 02월 28일

[3] 지역혁신인력양성사업(한국산업기술재단) 2003년 12월 01일

~ 2005년 08월 31일

[4]	Brain Busan 21 사업(부산광역시)	2002년	11월	01일	\sim	2005년	10월	31일
[5]	소프트웨어 진흥원(ITRC)	2002년	08월	01일	\sim	2005년	08월	31일
[6]	산학협동재단(예린)	2002년	06월	01일	\sim	2003년	05월	31일
[7]	기초기술연구지원사업	2002년	07월	01일	~	2003년	06월	30일