

工學碩士 學位論文

Paint형 전파흡수체의 전파흡수성능
향상에 관한 연구

A Study on the Improvement of EM Wave
Absorption Characteristics in Paint-type EM
Wave Absorbers

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 正 賢

本 論文을 崔正賢의 工學碩士
學位論文으로 認准함

委員長：工學博士 趙 炯 來



委 員：工學博士 鄭 智 元



委 員：工學博士 金 東 一



2006 年 2 月

韓國海洋大學校 大學院

電波工學科

崔 正 賢

목 차

Nomenclature	iii
Abstract	v
제 1 장 서 론	1
1.1 연구 배경	1
1.2 연구 목적	2
제 2 장 전파흡수체 이론 및 측정법	4
2.1 전파흡수체 이론	4
2.1.1 전파흡수체의 분류	6
2.1.2 전파흡수체의 재료	8
2.1.3 전파흡수체에 요구되는 특성	11
2.1.4 전파흡수체 분포정수 회로화	12
2.2 전파흡수체 측정법	25
2.2.1 다층형 전파흡수체	25
2.2.2 전파흡수체의 반사계수와 재료정수 측정	30
제 3 장 Paint형 전파흡수체의 전파흡수성능 평가	35
3.1 Ferrite와 Paint의 종류에 따른 전파흡수능 분석	35
3.2 조성비에 따른 전파흡수능 분석 및 복소투자율	37
3.3 두께에 따른 전파흡수능 분석	40
3.4 평균입자크기 제어에 따른 전파흡수능 분석	41
3.5 $Al(OH)_3, TiO_2$ 의 코팅에 대한 전파흡수능 및 SEM 분석	42
3.6 Paint형과 Spray형 전파흡수체의 전파흡수특성 비교	46
3.7 다층형 전파흡수체 구성에 의한 전파흡수성능 향상	47

제 4 장 결 론	52
참고문헌	54
발표논문	55

Nomenclature

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

- ε : Permittivity
- ε_0 : Permittivity of vacuum
- ε_{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

ABSTRACT

As are being progressed electronics and radio communication technology, the human enjoy greater freedom in communication. However, EM wave environments in communication became complicate and more difficult to control. Thus, international organizations, such as the American National Standard Institution (ANSI), Federal Communications Commission (FCC), and the Comite Internationale Special des Perturbations Radio electrique (CISPR), etc, have provided standard for the EM wave environments and for the countermeasure of the electromagnetic compatibility (EMC).

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

In this thesis, the paint-type EM wave absorbers were studied in order to complement the defect of attaching sheet-type EM wave absorbers. The paint-type EM wave absorbers were fabricated using Mn-Zn, Ni-Zn, Ba, Sr ferrite, and sendust. In addition, enamel, epoxy, and urethane paints were used as binders.

As a result, the band-width of EM wave absorbers coated with $Al(OH)_3$ is larger than non-coated EM wave absorbers. EM wave absorption ability was increased by controlling particle size and composition rate. The bandwidth and EM wave absorption ability were increased with various layer-built thickness of absorbers. Reflection coefficients of the fabricated EM wave absorber with the thickness of 3 mm show 20.4 dB at 9.375 GHz.

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경

21세기 고도의 정보화시대에 정보통신기술이 발달함에 따라 다양한 정보의 혜택을 누리고 있으며 이는 통신량의 폭발적인 증가와 더불어 사용 주파수 대역의 확장을 초래하였으며, 전자·통신·제어기기의 저전력화, 소형화, 디지털화로 이어지고 있다. 이에 따라 전자과장해(EMI) 및 전자과환경양립성(EMC)에 대한 관심이 고조되고 그 심각성이 부각되어 국제무선장해특별위원회(CISPR) Pub.22 에서는 30 MHz ~ 1,000 MHz의 주파수 범위에서 전자기로부터의 누설 전자파를 규제하였고, 그 후 1998년 11월에는 이를 더욱 확대하여 CISPR 11에서는 1 GHz ~ 18 GHz 까지 추가 확장하는 규제안을 채택하였다.

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

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

한편, EMS(전자파내성)에 대한 규격도 차츰 엄격해져 가고 있으며, 우리나라에서도 2000년부터 EMS 규제를 국내법으로 제정하여 시행하고 있다. 이와 같

은 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 방사를 억제하기 위한 EMI (Electromagnetic Interference) 제어 및 EMI 측정이 필수적이며 EMC (Electromagnetic Compatibility) 분야에서는 전자파환경의 정량화, 전자계분포의 측정 및 저자펄스의 측정 등이 필요하다.

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

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

1.2 연구 목적

현재 전자파 장해 대책을 위한 전파흡수체는 선박의 레이다 허상 방지용, TV 고스트 방지용, 레이더 전파의 흡수를 위한 RAM 및 각종 전자기기로부터의 전파누설 방지용 등으로 널리 사용된다. 이러한 전파흡수체는 지금까지 조성변화에 따른 흡수 특성 변화를 중심으로 전파흡수체를 제작하고 있었다. 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 흡

수체는 주파수 의존 특성이 매우 커서 사용하고자 하는 주파수대역에서 자기적, 전기적, 유전손실이 큰 재료를 이용하거나 이들을 혼합하여 최대의 손실특성을 나타내는 재료를 만드는 기술 개발이 필요하다. 재생 Mn-Zn ferrites와 Ni-Zn ferrites, Sr ferrites 및 Ba ferrites를 이용한 전파흡수체에 관한 연구에서도 이러한 재생 magnets가 전파흡수체에 유용한 재료임을 보고한 바있다[1-3].

Sheet형 전파흡수체는 지지재로 CPE나 silicon rubber를 사용하여 제작되어 시편의 유연성은 있으나 변형이 어려운 단점이 있다. 반면, paint형 전파흡수체는 시편의 유연성은 없으나 변형이 필요없이 사용되어질 수 있다. 따라서 본 논문에서는 선박이나 각종 전자기기에 기존의 sheet형 전파흡수체 부착시의 단점을 보완하기 위해 paint형 전파흡수체를 연구하게 되었다. 전파흡수체에 대표적인 재료로 사용되어 오던 Mn-Zn ferrites를 사용하여 paint형 전파흡수체를 제작하여 그 특성을 조사하였으며 단층의 paint형 전파흡수체의 전파흡수능 향상과 광대역화를 위하여 적층기법의 이용과 첨가제인 $Al(OH)_3$ 코팅에 따른 전파흡수체의 전파흡수능에 미치는 영향을 조사함으로써 paint형 전파흡수체의 전파흡수능 향상과 광대역 가능성을 입증하고자 하였다.

제 2 장 전파흡수체 이론 및 측정법

2. 1 전파흡수체 이론

전파흡수체는 전파를 흡수해서 열로 변환해 반사파를 발생시키지 않는 것이다. 이러한 전파흡수체의 용도는 전자파장해 문제의 심화와 함께 더욱 다양해져서 특정 주파수대 및 광대역 주파수대에서 그 성능이 우수한 전파흡수체의 개발이 요구되고 있다.

불요전파를 억제하는 일이 현재 심각한 문제로 제시되고 있으며, 이러한 EMC/EMI 문제의 해결 방법으로 접지, 차폐, 흡수의 세 가지 방법이 제시되고 있으나 이들 중 현재 가장 주목을 받고 있는 것이 바로 Absorbing을 이용한 전파흡수체이다.

전파흡수체의 역사는 길어서, 전파가 사용되게 된 당시부터 무반사종단기 등에 사용되었으며, 그 후 공간을 전파(博播)하는 전파(電坡)를 흡수하는 전파흡수체가 1960년대에 개발되어 전파암실(전파무향실)이나 안테나의 지향성 개선 등에 널리 사용되어 왔다.

제 1세대의 흐름은, 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 반사감쇠량을 가지는 흡수체를 개발할 필요가 있다. 따라서, 금후 30 MHz 이상의 전주파수를 커버하는 두께가 얇은 흡수체의 개발 연구가 필요하고 이것이 제 4 세대라고 불릴 수 있다.

전파의 흡수란 전파에너지가 열에너지로 변환되는 현상이며 이와 같은 현상을 적극적으로 이용하여 반사파가 생기지 않게 하는 특수재료가 전파흡수체이다.

이상적인 전파흡수체는 입사해온 전파에너지를 모두 열에너지로 변환시키는 것이다.[2]

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 중요시되면서도 갖추기가 어려운 것이 전자파의 출입을 제한하는 공간을 구성하는 것이다. 이와 같이 전자파의 출입을 제한하는 공간을 전파암실이라 하고, 이곳에서 광학실험실의 검은색 커튼과 같은 역할을 하는 것이 전파흡수체이다. 만약에 전기에너지를 갖고 있는 건전지에 전구를 연결 하면 전구는 빛을 방사하는 동안 뜨거워진다. 이것은 전기에너지가 변화하여 빛과 열에너지로 변화하는 것을 보여 주는 것이다. 일반적으로 전기 에너지를 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 정합 되도록 설계하면 공간의 전파에너지가 흡수되어 열에너지로 변하게 되는 것이다. 결과적으로 전파흡수체는 도달하는 전파 에너지를 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 저저항체, 손실재료 등이 있다. 손실재료의 분포정수회로(전송선로)의 기본식과 평면파의 미분방정식을 비교해보면 저항과 컨덕턴스는 각각 복소투자율의 허수항과 복소유전율의 허수항에 대치되며 도전율은 복소유전율의 허수항에 추가된다. 결국 도전 손실재 σ , 자성손실재 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) 전파가 1회 밖에 손실재료에 부딪히지 않는 경우 : 그 대표적인 예는 TV 신호의 반사방지에 사용되는 손실재이다.
- 3) 어떤 정해진 통로(전송로)를 통과하는 전자파에 손실을 부여하는 경우 : 그

대표적인 예로는 동축케이블 주위에 붙인 손실재나 전자레인지용 누설방지 손실재가 있다.

이와 같이 전파 흡수체는 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.

2.1.1 전파흡수체의 분류

1) 층수에 의한 분류

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

가) 단층형 전파흡수체

전파흡수재료가 한 장의 층으로 되어 있고, 보통 이면에는 알루미늄이나 철판 등의 금속이 붙어 있다. 저항피막에 의한 $\lambda/4$ 형 전파흡수체나, 유전성 전파흡수재료에 의한 단층형 전파흡수체는 일반적으로 주파수 대역폭이 좁은 협대역형 전파흡수특성을 나타낸다. 단 자성전파흡수체인 페라이트 타일은 비교적 넓은 주파수특성을 나타내는 것이 특징이다.

나) 2층형 전파흡수체

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

다) 다층형 전파흡수체

전파흡수체를 구성하는데 층의 수가 많은 것은 다층형 전파흡수체라 한다. 단, 층의 수를 그대로 불러서 3층형 전파흡수체, 4층형 전파흡수체라 부르는 경우가 있다. 일반적으로 전파흡수체는 다층형으로 구성함으로써 주파수 대역폭

이 넓어진다. 따라서 광대역 특성이 요구되는 전파무향실용으로 다층형 전파흡수체를 이용한다.

2) 외관에 의한 분류

전파흡수체를 외관에 의해 분류하면 다음과 같다.

가) 평판형 전파흡수체

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

나) 산형 전파흡수체

흡수체의 형상에 있어 최전면이 전파흡수재료에 의한 산형의 삼각형을 한 형상을 갖는 전파흡수체를 산형 전파흡수체라 한다. 이것은 최전면을 산형으로 함에 따라서 그 부분의 전파 감쇄정수가 전파 진행 방향에 대해서 직선적으로 서서히 크게 되므로 고아대역 특성이 얻어지는 특징이 있다.

다) 피라밋형 전파흡수체

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

3) 주파수 특성에 의한 분류

전파흡수능은 허용 반사계수가 미리 설정된 값인 S 이하로 측정되는 특성을 갖는 것을 말하므로, 그 허용치 이하로 되는 주파수 비대역폭 $\Delta f/f_0$ 로부터 협대역형, 광대역형, 초광대역형으로 분류된다.

가) 협대역형 전파흡수체

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

나) 광대역형 전파흡수체

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

다) 초광대역형 전파흡수체

어느 하한 주파수 f_L 이상의 주파수 전역에서 허용 반사계수 이하가 되는 특성을 갖는 전파흡수체를 초광대역형 전파흡수체라 부른다. 따라서 주파수비대역폭은 무한대가 되어 정의할 수 없다. 층의 수가 적은 전파흡수체에서는 이러한 특성이 얻어지지 않고, 보통 다층형 전파흡수체에 의해서 실현된다.

2.1.2 전파흡수체의 재료

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

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

우선, 도전성 전파 흡수재료란 저항체나 저항선, 저항피막으로, 이것에 흐르는 전류에 의해 전파를 흡수한다. 이 경우 적절한 저항치의 것을 생산할 필요가 있지만, 도전성 섬유에 의해 뛰어난 전파흡수체가 얻어지고 있다.

유전성 손실재료에는, 카본고무, 카본을 포함하고 있는 발포우레탄, 카본을

포함하고 있는 발포폴리스치를 등이 있다. 이런 종류의 흡수체를 이용해 광대역 특성을 얻고자 할 때는 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 페라이트다. 금속판으로 뒤를 붙인 페라이트 판은 비교적 넓은 주파수에 걸쳐 좋은 흡수특성을 나타낸다. 정합하는 주파수는 재질에 의해 결정되고, 대강 0.3 ~ 1.5 GHz의 범위에 있다. 흡수체의 두께는 얇고, 대부분의 것은 주파수에 관계없이 5 ~ 8 mm이고, 기존의 것중 제일 얇은 것은 700 MHz용 전파흡수체로서 그 두께는 0.8 mm이다. 또, 페라이트 분말을 고무에 섞어 혼합한 고무페라이트는 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 복소비유전율 ϵ_r , 복소비투자율 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 전파손실항을 나타내고, 다음과 같이 그 양자가 모두 0이면, 무손실재료이다.

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

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

자성 전파흡수재료란 가해진 자계에 의해 전파흡수가 일어나는 것이다. 따라

서 복소투자율의 허수부 μ'' 이 0이 아닌 것이 자성 전파흡수재료이다.

이때, 복소비유전율의 허수부 ϵ_r'' 은 0 이어도 0이 아니어도 상관없다. 즉, 자성손실과 함께 도전손실 혹은 유전손실을 갖는 재료도 있다. 또 복소수 비투자율의 실수부가 $\mu_r'' \neq 1$ 인 것은 자성체라 부르고 있고, 그중에서 $\mu'' = 0$ 되면 무손실자성체이다.

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 저항율 ρ 가 있다. 이 저항율 ρ 는 도전전류 흐름의 어려움을 나타내는 정수로, 직류회로에 있어서 옴 법칙의 정수이다. 그러나 높은 주파수에 있어서도 도전전류만 흐르는 것으로 가정하면, 복소비유전율의 허수부 ϵ_r'' 은 저항율 ρ 혹은 도전율 χ 을 이용해 다음 식으로 표현된다.

$$\epsilon_r'' = \frac{1}{\omega \epsilon_0 \rho} = \frac{\chi}{\omega \epsilon_0} \quad (2.4)$$

여기서, ϵ_0 는 진공의 유전율로 $\epsilon_0 = 8.85418782 \times 10^{-12}$ [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 전파흡수 재료라 말한다.

이것에 대해, 유전체에 손실분말 등을 혼합한 재료는 식 (2.4)을 만족하지 않는다. 그 이유는, 혼합매체에서는 저항체가 유전체 중에 분산된 형으로 되기 때문에 그 등가회로는 복잡하게 된다고 예상된다. 따라서, 직류에서는 전류가 거의 흐르지 않기 때문에 저항율 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 전파흡수 재료라 부르는 것이다.

2.1.3 전파흡수체에 요구되는 특성

전파흡수체는 그 반사계수를 작게하는 것이 절대조건이지만 투과량도 적게하지 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, 주파수특성, 두께 등이 중요하다. 이들은 사용 목적에 따라 다르지만 단층구조에서는 충분한 특성이 얻어지지 않기 때문에, 보다 나은 특성을 달성하기 위해 다층구조로 하는 것이 많다.

다음은 일반적으로 전파흡수체에 요구되는 특성을 간단히 설명한 것이다.

1) 사용주파수가 높을 것

모든 주파수에 대해 허용반사계수 이하로 하는 것은 불가능하므로 필연적으로 사용주파수가 한정된다. 그래서 가능한 한 사용주파수가 넓은 것이 좋다. 단, 주파수에 따라서 대역폭이 다르므로 주파수의 관점에서 본 전파흡수체의 모양은 사용주파수폭 Δf 을 중심주파수로 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 사입사특성도 양호한 전파흡수체를 만들어야 한다.

4) 가벼울 것

전파흡수체는 전파무향실의 벽이나 천정에 사용하거나 고층건물의 벽면이나 대형교량의 금속부재에 붙이므로 가능한 한 가벼운 것이 좋다. 따라서 박형화된 sheet형 전파흡수체 또는 paint형 전파흡수체가 적합하다.

5) 강도가 있을 것

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

6) 내후성(耐候性)이 뛰어날 것

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

2.1.4 전파흡수체 분포정수 회로화

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 회전
을 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 다음
과 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 수직인 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 전류원로부터 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 임피던스와 전파정수로 정의되며 이러한 선로는 분포정수회로로 해석된다. 여기서 R 은 단위길이 당 저항 성분(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

페이지 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

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

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

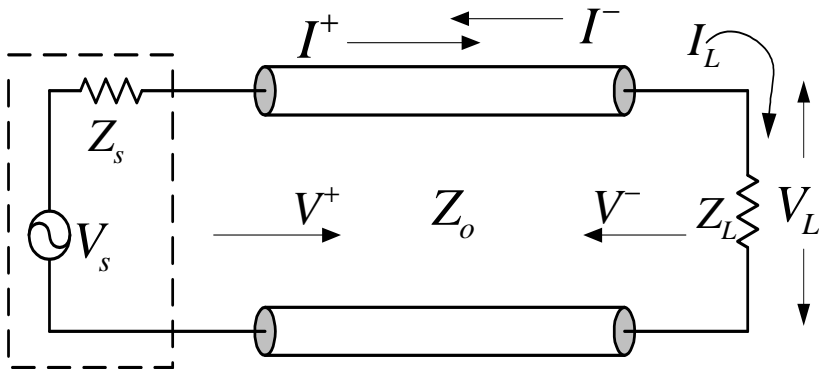


그림 2.1 일반적인 전송선로

Fig. 2.1 General Transmission Line.

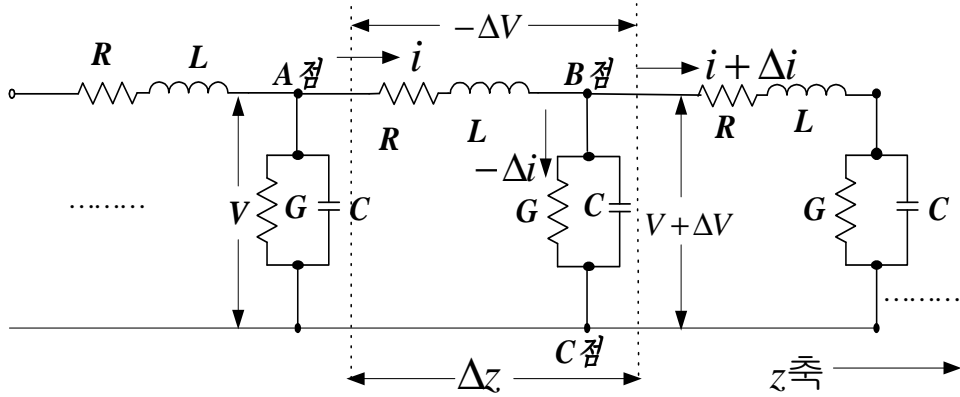


그림 2.2 일반적인 전송선로의 등가회로

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. 분포정수회로화

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

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

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

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

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

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

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

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

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 $\mu', \varepsilon', \omega\mu'', \omega\varepsilon''$ 에 대응하게 된다.

이것을 정리하면

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

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.

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

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

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

로 소문자로 나타내기로 한다.

또한 진공중과 임의의 매질에서 전파정수는 각각

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

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

로 되어 분포정수회로 상의 파라미터 R, L, C, G 를 전자장 파라미터로 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. 이 둘 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 진행되는 파로서 부하측에서 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 2.3와 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 특성임피

던스이다. 따라서 식 (2.41)에 식 (2.34), (2.35)를 적용하면 수전단에서 두께 d 만
 클 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

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

이 된다.

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

식 (2.25)와 식 (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

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

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

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

또 반사계수를 정규화 임피던스로 나타내면

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

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 전파흡수

는 일어나지 않는다[6].

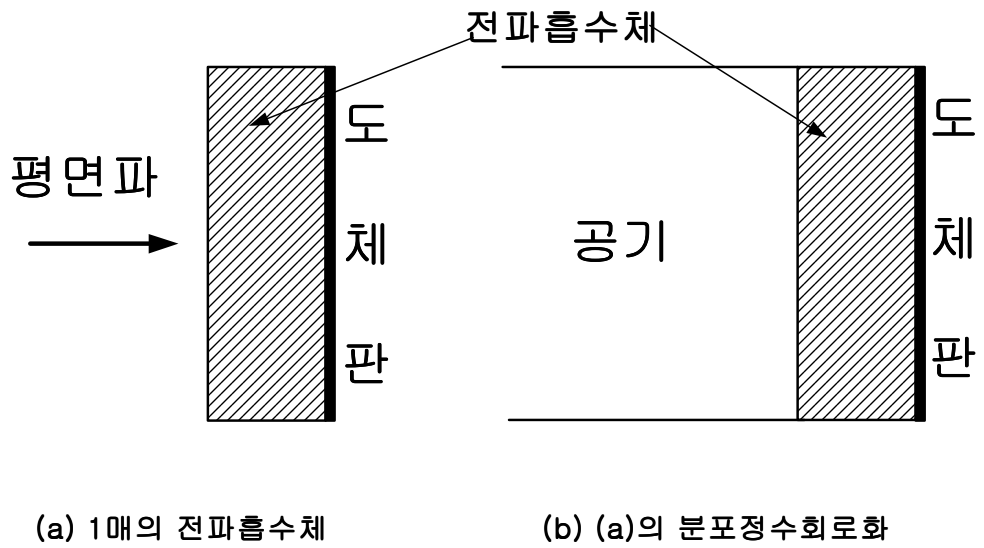


그림 2.3 전파흡수의 기본 구성

Fig. 2.3 Basic composition of electromagnetic wave absorber.

2.2 전파흡수체 측정법

2.2.1 다층형 전파흡수체

페라이트 전파흡수체를 광대역하기 위하여 페라이트 층 사이에 공기층을 삽입하거나 재료정수가 다른 페라이트 전파흡수체를 2개 이상의 층으로 조합한 모양, 또는 재료정수는 동일한 물질이나 전파흡수체의 형상을 공간적으로 변화시킴으로써 재료정수를 조작하여 페라이트 전파흡수체를 광대역화하고자 하는 시도가 이루어지고 있다.

1. 유전체 재료를 사용한 다층형 전파흡수체

그림 2.4는 전파흡수체의 매질 정수를 전파의 진행방향에 따라 서서히 변화시켜서 임피던스 정합을 피하는 것이다. 이 경우 금속판으로부터 거리 x 인 점에서의 규격화 입력임피던스 Z_x 는 다음의 미분방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{dZ_x}{dx} = j \frac{2\pi}{\lambda} (1 - \epsilon_{rx} Z_x^2) \quad (2.52)$$

λ : 입사파의 파장

ϵ_{rx} : x 에 있어서의 매질의 복소유전율

이라 하고 투자율에 대해서는 자유공간중의 μ_0 가 매체중에서도 변화하지 않는 것으로 한다. 또 전파흡수체 표면에서의 규격화 입력임피던스를 \hat{z} 라 하면, 이점에 있어서의 반사계수 S 는 식 (2.53)와 같다.

$$S = \frac{\hat{z} - 1}{\hat{z} + 1} \quad (2.53)$$

따라서, 흡수체가 무반사로 되기 위한 조건은 $\hat{z} = 1$ 이다. 그러나, 이것을 완전히 실현하는 것은 어려우므로 허용 반사계수를 S_0 라 했을 때, 실용 정합조건은 다음 식 (2.54)와 같은 식이 된다.

$$\frac{\hat{z}-1}{\hat{z}+1} \leq |S_0| \quad (2.54)$$

따라서 식 (2.54)를 조건으로 하여 식 (2.52)을 풀어서 Z_x 를 구하면 된다. 그러나, 식 (2.52)은 Riccati의 비선형 미분방정식으로 범함수이므로 해석적 방법으로 해를 구하는 것은 어렵다. 그래서 금속판 표면으로부터 거리 x 에 대한 임피던스의 분포를 각각 가정하고, 그때의 반사계수의 주파수 특성을 계산하여 최적인 임피던스 분포를 찾는 방법이 사용되고 있다. 여기서 $|S_0| < 0.1$ 인 경우, 필요한 두께의 최소치는 $1/\lambda = 0.35$ 정도이며 이때 ϵ_{rx} 의 값은 식 (2.55)과 같이 된다.

$$\epsilon_{rx} = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' = 1 - j \left[\frac{3.9(1-x)}{1} - 0.9 \right] \quad (2.55)$$

그러나, 실제 이와 같은 ϵ_{rx} 의 분포를 실현하는 것은 어려우므로 부분적으로 흡수체의 재료정수가 다른 것을 중첩한 다단형 구조로 설계하고 있다. 이 경우 자유공간 특성임피던스에 대해서 단계적으로 임피던스 정합을 행하므로 그 특성은 각 층의 두께와 재료정수에 의해서 결정된다. 단수를 증가시키면 그림 2.1의 연속 분포형에 접근하지만, 실용적으로는 가능한 한 단수를 적게 하고, 또 전체의 두께를 얇게해서 원하는 특성을 얻을 필요가 있다.

2. 자성재료를 이용한 다층형 전파흡수체

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

3. 다층형 전파흡수체의 기본식

그림 2.4와 같이 통상 페라이트 전파흡수체를 광대역화 하기 위해서는 여러 장의 페라이트 판을 간격을 두고 배치하는 다층 분리형이 유효하다. 그림 2.5와 같이 흡수체의 뒤에 금속판을 부착하고, 그 전면에 n 개 층의 전파흡수체를 적층한 경우, 제 n 층의 두께를 d_n , 비투자율을 μ_{rn} , 비유전율을 ϵ_{rn} 으로 했을 때 평면파가 흡수체 전면에서 수직으로 입사하면, n 층의 전면에서 우측을 보는 규격화 입력임피던스 Z_n 은 식 (2.56)와 같이 된다.

$$Z_n = Z_{cn} \frac{Z_{n-1} + Z_{cn} \tanh(\gamma_n d_n)}{Z_{cn} + Z_{n-1} \tanh(\gamma_n d_n)} \quad (2.56)$$

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

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

$$Z_{cn} = \sqrt{\mu_{rn} / \epsilon_{rn}} \quad (2.57)$$

$$\gamma_n = j\omega \sqrt{\mu_{rn} \epsilon_{rn}} \quad (2.58)$$

따라서 식 (2.57)와 식 (2.58)을 대입하여 정리하면 다음 식 (2.59)과 같다.

$$Z_n = \sqrt{\frac{\mu_{rn}}{\epsilon_{rn}}} \frac{Z_{n-1} + \sqrt{\frac{\mu_{rn}}{\epsilon_{rn}}} \tanh(j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\mu_{rn} \epsilon_{rn}} d_n)}{\frac{\sqrt{\mu_{rn}}}{\epsilon_{rn}} + Z_{n-1} \tanh(j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\mu_{rn} \epsilon_{rn}} d_n)} \quad (2.59)$$

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

$$S_n = \frac{Z_n - 1}{Z_n + 1} \quad (2.60)$$

와 같이 된다. 따라서, 허용반사계수를 $|S_0|$ 라고 했을 때, $S_n = \frac{Z_n - 1}{Z_n + 1} \leq |S_0|$ 을 조건으로 하여 전체 두께를 최소로 하는 전파흡수체를 설계하면 된다. 식 (2.59) 에 의하면 이미 재료 정수를 알고 있는 페라이트를 적층한 경우, 각 층의 두께를 적절하게 조절함으로써 전체 입력임피던스를 변화시킬 수 있음을 알 수가 있다. 따라서 이미 개발된 전파흡수체 위에 재료정수가 다른 흡수체층을 추가함으로써 기존 단층 전파흡수체로 cover할 수 없는 주파수대에서도 흡수특성이 뛰어난 전파흡수체를 설계하는 것이 가능하다[10].

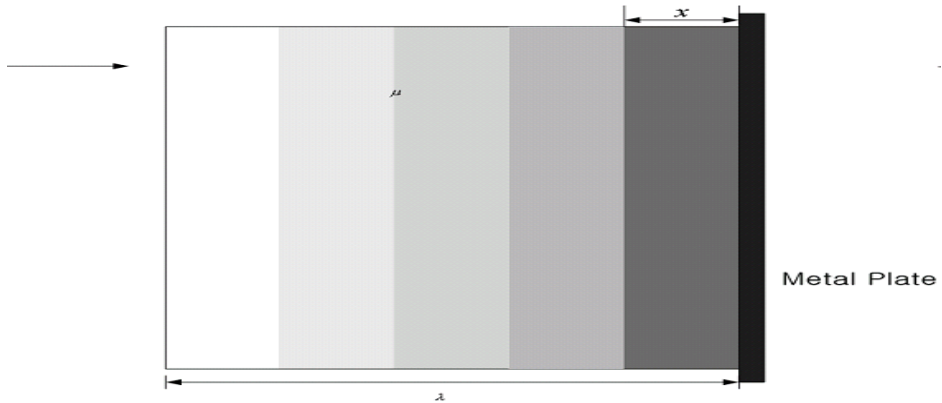


그림 2.4 광대역 전파흡수체

Fig 2.4 Wide-band electromagnetic wave absorber.

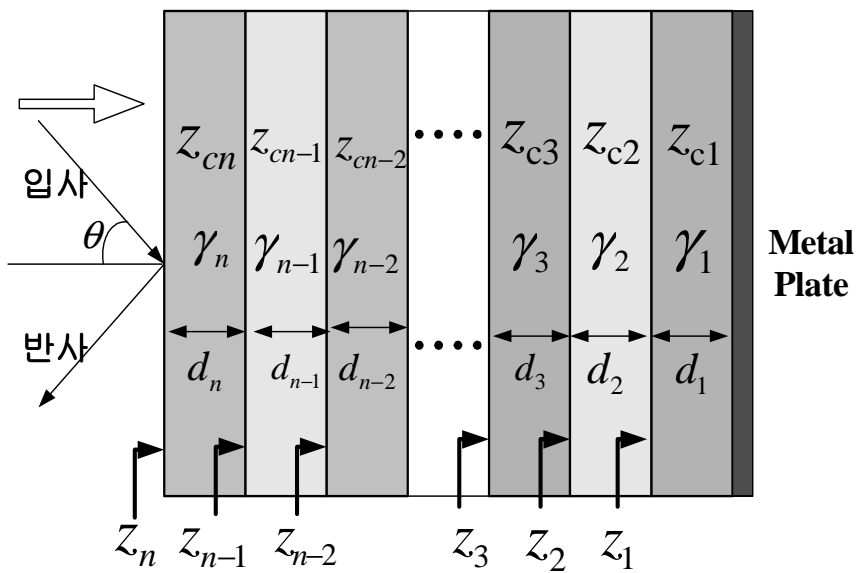
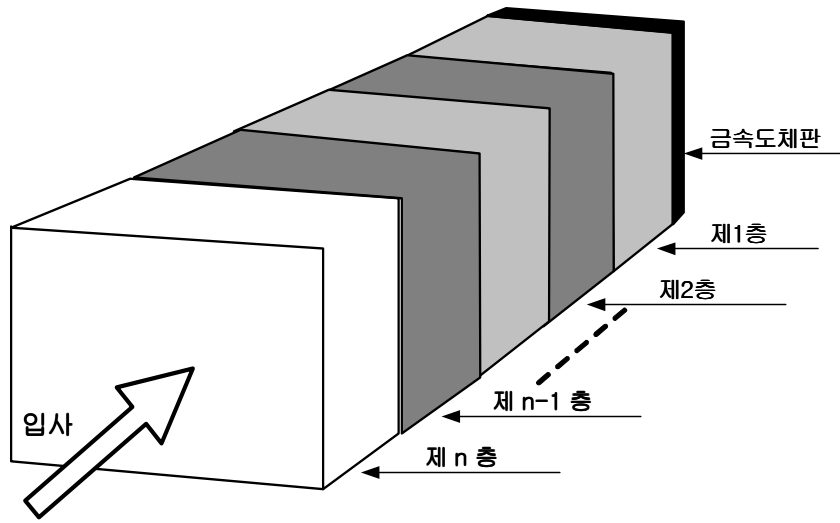


그림 2.5 다층형 전파흡수체

Fig. 2.5 Multi-layered electromagnetic wave absorber.

2.2.2 전파흡수체의 반사계수와 재료정수 측정

1. 사용된 Sample 및 Sample holder

그림 2.6은 시료를 측정할 수 있도록 만들어진 sample holder의 단면(a)과 위에서 본 평면(b)의 그림이다. 진하게 칠해져 있는 부분이 sample이 삽입되는 곳이며, 이 holder는 Network Analyzer(HP8753D)와의 연결 시 틈이 없는 sample holder이다. 그림 2.7은 sample holder의 단면도와 평면도이다.

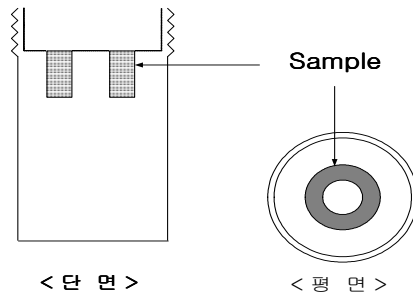
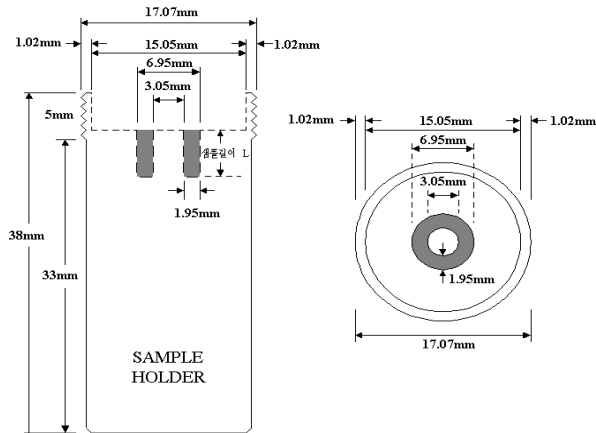


그림 2. 6 샘플홀더의 단면 · 평면도

Fig. 2. 6 Cross section of a sample holder.



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

그림 2. 7 Sample holder 단면도와 평면도

Fig. 2. 7 Section and plane of the sample holder.

2. 전파흡수체의 반사계수 측정

본 논문에서 제작된 paint형 전파흡수체 반사계수를 측정하는데 사용되는 장비는 다음과 같다. 그림 2.8의 Network Analyzer와 그림 2.9의 sample holder가 사용된다.



그림 2. 8 Model 360B 네트워크 어날라이저
Fig. 2. 8 Model 360B Network Analyzer.



그림 2. 9 Wiltron사의 sample holder
Fig. 2. 9 Sample holder of wiltron company.

3. 재료정수 측정법

본 논문에서의 전파흡수체 시편의 재료정수는 반사손실을 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, Reference Plane에서의 반사계수 $S_{11}(\ell)$ 은 전체의 반사계수 $S_{11}'(\ell)$ 과 같게 된다. 그러므로 short sample의 측정치로 전체 반사계수를 측정할 필요 없이 sample 길이가 ℓ 일 때와 2ℓ 일 때의 임피던스만 계산하면 된다.

우선 그림 2.10와 같이 sample 길이가 ℓ 일 때의 임피던스는

$$\mathcal{Z}(\ell) = \frac{1 + S_{11}(\ell)}{1 - S_{11}(\ell)} \quad (2.61)$$

와 같이 구해진다.

그림 2.11과 같이 Sample 길이가 2ℓ 일 때의 반사계수 $S_{11}(2\ell)$ 은 전체의 반사계수 $S_{11}(\ell)$ 과 같게 된다. 그러므로 2ℓ 일 때의 임피던스는 식 (2.62)과 같다.

$$\mathcal{Z}(2\ell) = \frac{1 + S_{11}(2\ell)}{1 - S_{11}(2\ell)} \quad (2.62)$$

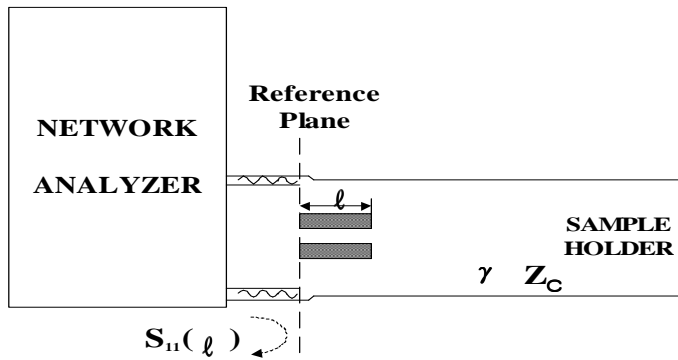


그림 2.10 샘플의 길이가 ℓ 인 sample holder

Fig. 2.10 sample holder with sample length ℓ .

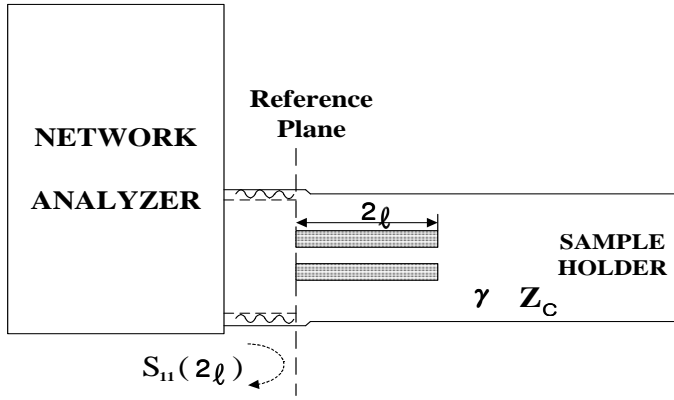


그림 2.11 샘플의 길이가 2ℓ 인 sample holder

Fig. 2.11 Sample holder with sample length 2ℓ .

한편, Network Analyzer의 port와 sample holder는 틈이 없이 밀착되므로, 식 (2.61)과 식 (2.62)는

$$Z(\ell) = Z_c \tanh(\gamma\ell) \quad (2.63)$$

$$Z(2\ell) = Z_c \tanh(\gamma 2\ell) \quad (2.64)$$

와 같이 쓸 수 있다. 식 (2.63)와 식 (2.64)에 하이퍼볼릭 탄젠트 공식을 적용하면,

$$\tanh(\gamma 2\ell) = \frac{2 \tanh(\gamma\ell)}{1 + \tanh^2(\gamma\ell)} \quad (2.65)$$

이 되고, 식 (2.65)을 변형하면

$$Z(2\ell) = \frac{2 \tanh(\gamma\ell)}{1 + \tanh^2(\gamma\ell)} Z_c \quad (2.66)$$

$$\tanh(\gamma\ell) = \sqrt{\frac{2Z_c - Z(2\ell)}{Z(2\ell)}} \quad (2.67)$$

이 된다. 식 (2.67)로 부터 γ , Z_c 을 도출하면,

$$\gamma = \frac{1}{\ell} \tanh^{-1} \sqrt{\frac{2Z(\ell) - Z(2\ell)}{Z(2\ell)}} \quad (2.68)$$

$$Z_c = Z(\ell) \sqrt{\frac{Z(2\ell)}{2Z(\ell) - Z(2\ell)}} \quad (2.69)$$

이 된다. 식(2.68)과 식 (2.69)을 식 (2.9)에 대입해서 풀면

$$\varepsilon_\gamma = -j \frac{C}{2\pi f} \cdot \frac{\frac{1}{\ell} \tanh^{-1} \sqrt{\frac{2Z(\ell) - Z(2\ell)}{Z(2\ell)}}}{Z(\ell) \sqrt{\frac{2Z(\ell)}{2Z(\ell) - Z(2\ell)}}} \quad (2.70)$$

$$\mu_\gamma = -j \frac{C}{2\pi f} \cdot \frac{1}{\ell} \tanh^{-1} \sqrt{\frac{2Z(\ell) - Z(2\ell)}{Z(2\ell)}} \cdot Z(\ell) \sqrt{\frac{Z(2\ell)}{2Z(\ell) - Z(2\ell)}} \quad (2.71)$$

이 구하여진다[7].

제 3 장 Paint형 전파흡수체의 전파흡수성능 평가

3. 1 Ferrite와 paint의 종류에 따른 전파흡수능 분석

paint형 전파흡수체는 같은 수지에 대해서 손실재료의 종류에 따라 매우 다른 전파흡수특성을 나타낼 것이라고 쉽게 예상 된다. 따라서 아래 그림 3.1은 soft ferrite인 MnZn, NiZn와 hard ferrite인 Sr, Ba ferrite 및 Fe, Si, Al의 합금분말로 이루어진 투자율이 매우 높은($\mu_i = 30,000$)의 Sendust를 각각 Enamel paint와 조성비 70:30 wt%로 혼합한 paint형 전파흡수체의 반사계수를 측정하여 비교한 것이다. MnZn ferrite 사용할 경우 다른 ferrite에 비해 2.68 GHz ~ 13.6 GHz의 비교적 넓은 대역에서 5 dB이상의 흡수능을 보이고 있다. 또한 같은 손실재료를 이용한 경우에도 paint의 종류에 따라 전파흡수특성이 각기 다를 것으로 예상되며 paint는 그 종류에 따라 실내용 및 실외용 그리고 목재용 및 철재용으로 이용되므로 본 실험에서는 각기 다른 paint를 기재로 전파흡수특성을 조사하고 그 결과를 그림 3.2에 나타냈다. 조성비가 MnZn:paint=70:30 wt%이고 두께 2 mm일 때 기계장치의 도장용으로 쓰이고 내구성, 내열성 및 부착성이 우수한 Urethane paint가 13.1 GHz에서 17.8 dB로 다른 paint에 비해 우수한 흡수능을 보이고 있다. 금속제품의 도장용 enamel paint, 건물외벽 도장용 wet paint, 목재 및 금속제품의 도장용 epoxy paint를 바인더로 사용하여 paint형 전파흡수체의 용도에 맞추어 설계하기 위해 측정하였다.

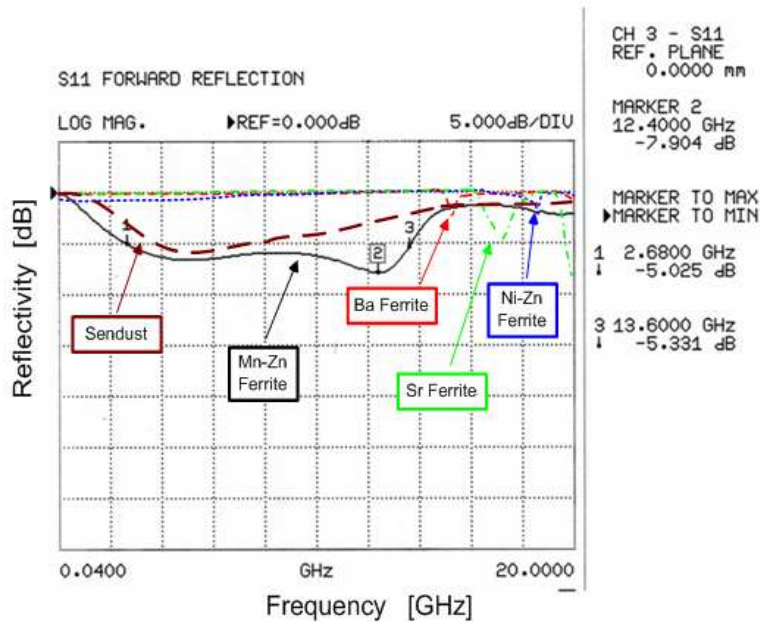


그림 3. 1 Ferrite의 종류에 따른 paint형 전파흡수체의 반사계수
 Fig 3. 1 The reflection coefficient of paint-type absorber for various ferrites
 (sample thickness = 2 mm)

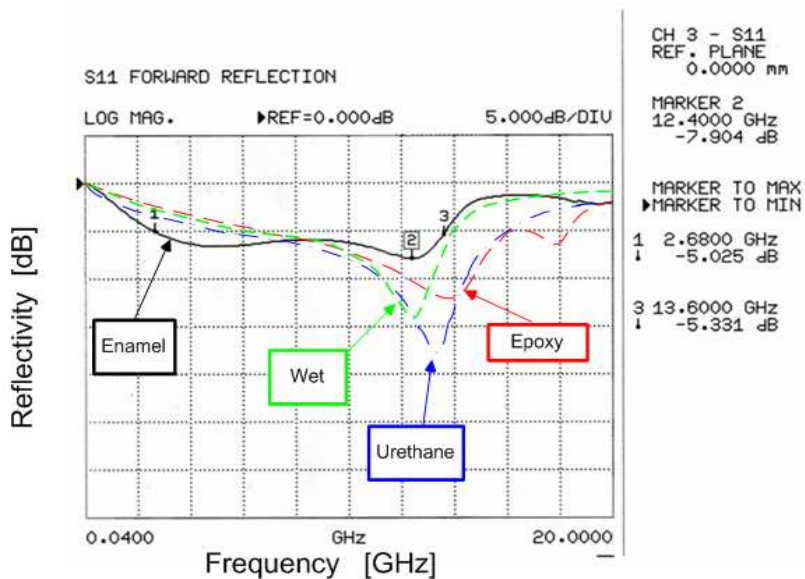


그림 3. 2 paint종류에 따른 paint형 전파흡수체의 반사계수
 Fig 3. 2 The reflection coefficient of paint-type absorber for various paints
 (sample thickness = 2 mm)

3. 2 조성비에 따른 전파흡수능 분석 및 복소투자율

전파흡수체에서 조성비의 변화는 전파흡수특성을 제어하는 중요한 인자 중 하나로 조성비를 변화시켜 paint형 전파흡수체의 흡수능을 향상시키기 위해 MnZn:Enamel paint wt%의 조성비가 70:30 wt%일 때와 65:35 wt%일 때 그리고 60:40 wt%일 때 전파흡수체를 제작하고 그들의 전파흡수특성을 표 3.1과 그림 3.3에 나타내었다.

완전한 전파흡수체로 되기 위한 조건은 식(3.1)과 같이 임피던스 Z 가 1이 되면 된다. 즉, 정합조건에서 주파수 f 와 두께 d 를 파라미터로 해서 Z 의 궤적을 Smith chart상에 그려 $Z=1$ 을 통하는 경우의 f_m, d_m 을 결정하면 전파흡수체의 설계가 가능해 진다.

전파흡수체가 정합조건을 만족하기 위해서는 재료정수를 측정하여 $\mu'_\gamma, \mu''_\gamma, \epsilon'_\gamma, \epsilon''_\gamma$ 를 구하고, f 와 d 를 포함한 이들 인자를 정합조건식에서 제어하여야 한다. 각 조성비에 따른 재료정수를 측정하여 그림 3.4에 나타내었다. 복소 투자율의 허수부 μ'' 은 자기적 손실을 나타낸다. 자성손실재를 이용한 전파흡수체의 흡수능은 자기손실과 매우 밀접한 관계가 있다.

자성손실재료로 하는 전파흡수체의 흡수능은 $\tan\delta = \mu''/\mu' > 1$ 일 때 즉 투자율의 허수부가 실수부보다 큰 영역에서 효과적인 흡수능을 나타낸다고 보고되고 있다[4].

따라서 그림 3.4는 이들 시편에 대해서 주파수를 함수로 하는 투자율을 조사한 그래프로써 두 시편 모두 $\tan\delta = 1$ 을 나타내는 주파수가 12.12 GHz ~ 12.16 GHz 부근임을 볼 때 본 연구에서 제작한 시편 모두 이 사실과 일치하고 있음을 알 수 있다.

$$Z = \sqrt{\frac{\mu_\gamma}{\epsilon_\gamma}} \tanh\left(j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon_\gamma \mu_\gamma} d\right) = 1 \quad (3.1)$$

표 3. 1 조성비에 따른 진파흡수체의 정합주파수 및 두께

Table 3. 1 Matching frequency and thickness for various composition rate.

조성비 MnZn:Enamel paint (wt%)	두께 (mm)	정합주파수 (GHz)
70:30	1.71	12.16
65:35	1.8	12.16
60:40	1.88	12.12

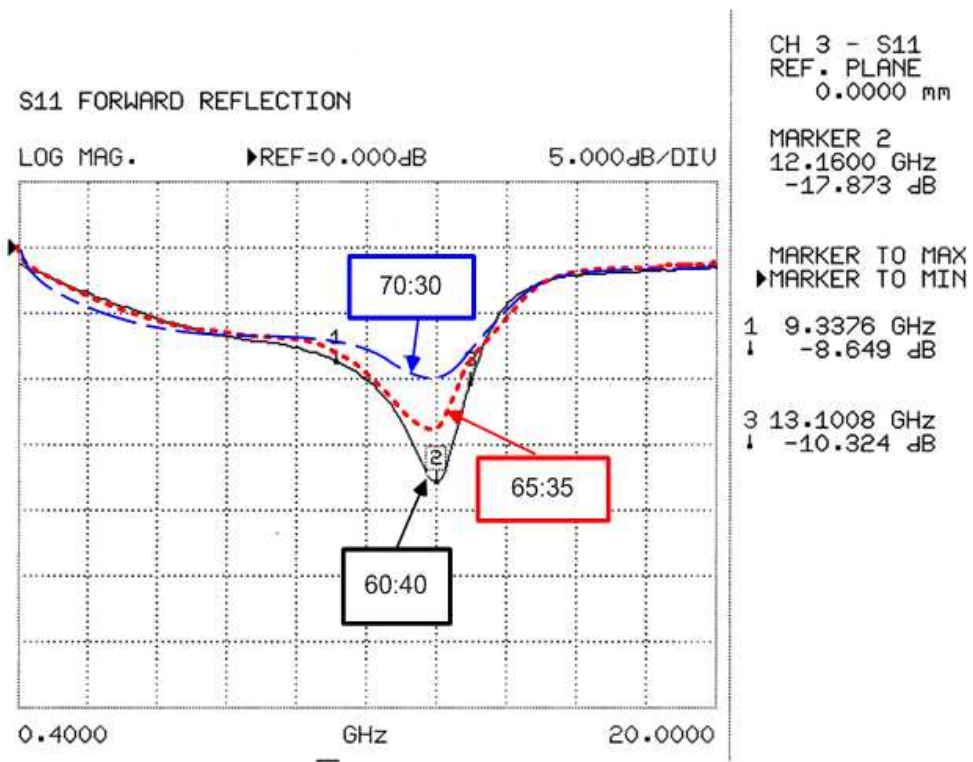
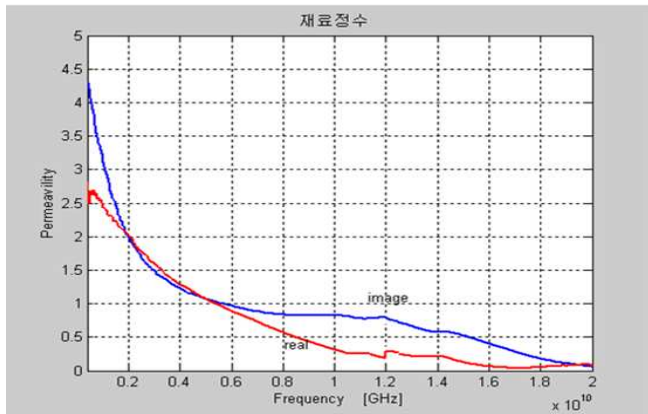
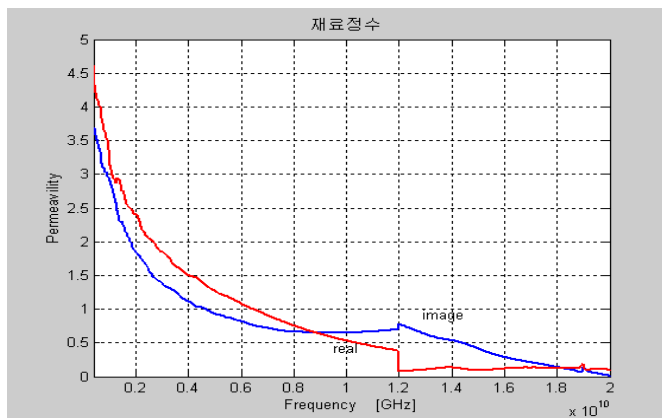


그림 3. 3 조성비에 따른 paint형 진파흡수체의 반사계수

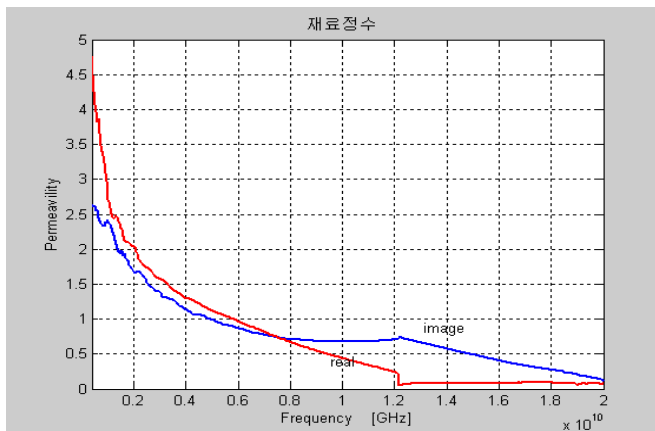
Fig 3. 3 The reflection coefficient of paint-type absorber for various composition rate.



a) MnZn : Enamel paint = 70 : 30 wt%



(b) MnZn : Enamel paint = 65 : 35 wt%



c) MnZn : Enamel paint = 60 : 40 wt%

그림 3. 4 조성비에 따른 전파흡수체의 복소 투자율

Fig. 3. 4 Complex permeability of the absorber for various composition rate.

3.3 두께에 따른 전파흡수능 분석

전파흡수체의 전파흡수능에 영향을 미치는 중요한 인자로 전파흡수체의 두께를 들 수 있다.

그림 3.5는 최대 흡수능을 나타내는 조성비 MnZn:Enamel paint=60:40 wt%의 2 mm이하 두께 변화에 따른 반사계수를 측정된 것이다. 두께가 얇아질수록 정합주파수가 고주파대로 이동하고 있으며 흡수능은 감소하고 있으며 두께 0.5 mm이하에서 급격하게 흡수능이 감소하였다. 두께가 증가함에 따라 정합주파수가 저주파대로 이동하며 이는 아래 식 (3.2)에 나타낸 일반적인 전파흡수특성을 만족한다[5].

$$d = \frac{c}{2\pi\mu_r f} \quad (3.2)$$

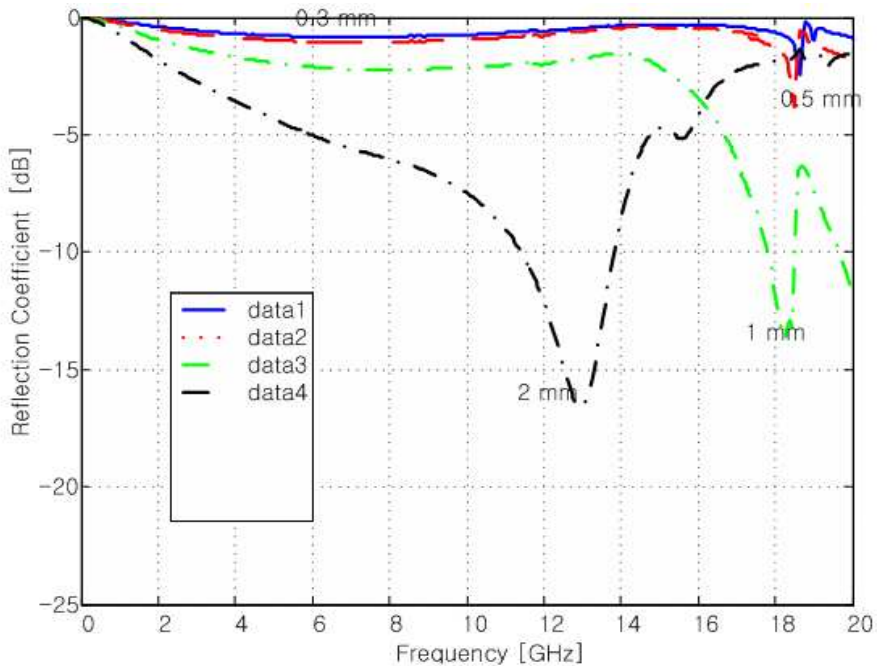


그림 3. 5 두께변화에 따른 paint형 전파흡수체의 반사계수

Fig 3. 5 The reflection coefficient of paint-type absorber for various thickness.

3.4 평균입자크기 제어에 따른 전파흡수능 분석

자성재료의 입자 크기가 paint형 전파흡수체의 전파흡수특성에 미치는 영향을 조사하기 위해 분쇄시간을 달리하여 평균입자크기를 조절한 뒤 평균입도 분포기로 입자의 크기를 조사하고 이들의 전파흡수특성을 조사하였다. MnZn ferrite의 평균입자크기 9.72 μm , 150 μm , 250 μm 에 대해 조성비를 MnZn : Enamel paint = 60 : 40 wt%로 일정하게 하고, 두께를 2 mm가 되도록 제작하여 그 반사계수를 측정하여 그림 3.6에 나타내었다.

입자크기가 증가함에 따라 전파흡수능이 증가하면서 정합주파수가 저주파대로 이동하고 있다. 입자크기가 작을수록 정합주파수가 높은 주파수로 이동하는데 이는 입자가 작을수록 높은 주파수에서 공명이 일어나기 때문이다. MnZn ferrite의 평균입자크기가 250 μm 일때 13.8 GHz에서 25 dB의 전파흡수능을 보이고 있다.

지금까지 사용되어진 평균입자크기가 일정하지 않은 MnZn ferrite를 평균입자크기를 일정한 크기로 제어 한다면 전파흡수능을 향상 시킬 수 있으며 원하는 주파수 대역에서의 전파흡수능을 얻기에 용이 할 것으로 사료된다.

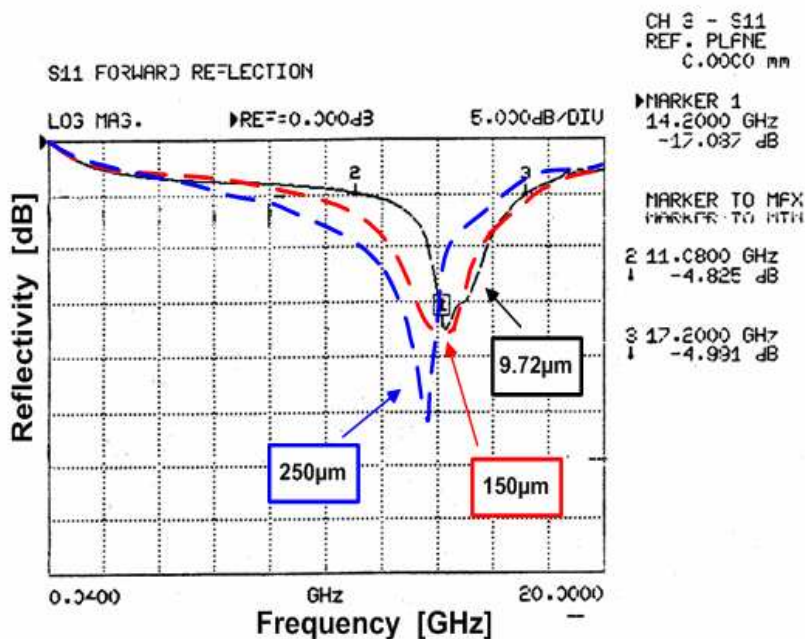


그림 3. 6 평균입자 크기에 따른 반사계수

Fig. 3. 6 The reflection coefficient of the absorber for various particle size.

3. 5 $Al(OH)_3$ 및 TiO_2 의 코팅에 따른 전파흡수능 및 SEM 분석

본 장에서는 페라이트입자의 표면에 비저항이 매우 높은($10^{12} \Omega - m$) $Al(OH)_3$ 을 코팅하고 이들이 전파흡수특성에 미치는 영향을 조사하였다. 그림 3.7은 MnZn Ferrite에 $Al(OH)_3$ 를 코팅하여 paint형 전파흡수체를 제작하는 공정이다. 코팅을 위한 첨가제인 CMC 수용액을 자성재료인 MnZn ferrite와 90:10 wt%의 비율로 혼합하고 이를 30분간 mixing과 drying과정을 거치면서 MnZn와 $Al(OH)_3$ 를 80:20 wt%의 비율로 코팅하게 된다. 코팅되어진 MnZn을 paint와 혼합하여 최종적으로 $Al(OH)_3$ 로 코팅된 paint형의 전파흡수체를 제작하였다.

또한, 표 3.2의 전파흡수체 제조조건인 조성비, $Al(OH)_3$ 의 함량, 두께를 변화시키면서 제작하였다. 그림 3.8에 나타낸 바와 같이 $Al(OH)_3$ 를 코팅함으로써 전파흡수대역폭이 증가함을 알 수 있다. 이는 MnZn Ferrite를 둘러싸고 있는 $Al(OH)_3$ 가 Ferrite 입자사이의 강자성을 열화시킴으로써 상호 결합력을 약화시키고 높은 비저항체가 열손실을 증가시킨 것에 기인한 것이라고 생각된다.

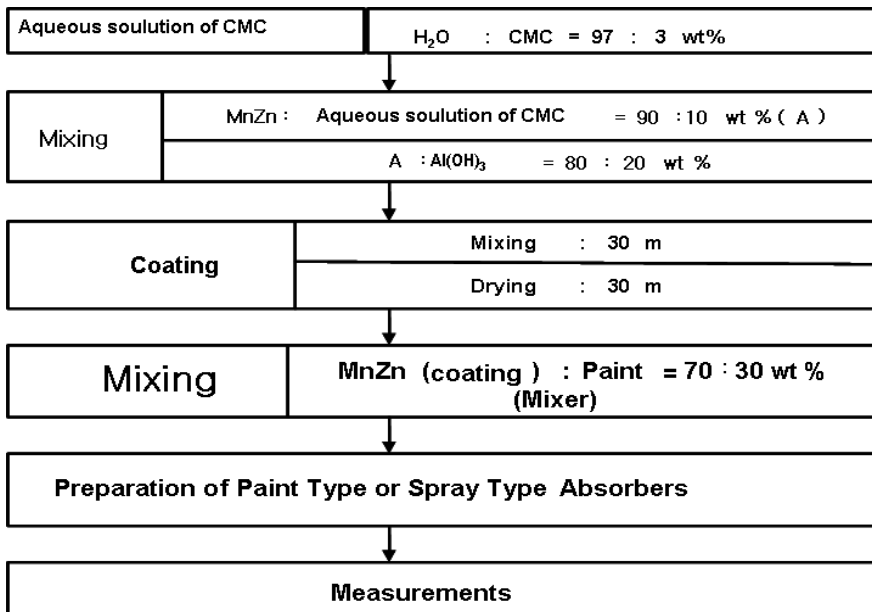


그림 3.7 Paint형 전파흡수체의 제작공정

Fig. 3.7 Preparation of paint-type EM wave absorbers.

표 3. 2 paint형 전파흡수체 제조조건

Table 3. 2 Manufacturing condition of paint-type EM wave absorbers.

Ferrite (wt%)	$Al(OH)_3$ 함량(wt%)	paint (wt%)	시편두께 (mm)
70	20	30	0.3
65		35	0.5
60		40	1
			2

MnZn ferrite에 $Al(OH)_3$ 와 TiO_2 의 coating은 전파흡수대역폭을 증가시켰다. 이는 단층형(Single-layer type)에서 전파흡수능이 협대역인 것을 보완하는 중요한 공정 중에 하나이다.

그림 3.8에서 MnZn ferrite에 $Al(OH)_3$ coating한 것은 전파흡수능이 5 dB이상인 구간이 2.68 GHz ~ 18 GHz의 넓은 대역을 커버하고 있다. 따라서 coating하지 않은것에 비해 약 5 GHz의 대역폭 향상을 보였다. MnZn ferrite에 TiO_2 의 coating한 것은 전파흡수대역폭을 증가시키지는 못했지만 3 dB의 전파흡수능을 향상시켰다. 그림 3.9에서도 마찬가지로 TiO_2 에 $Al(OH)_3$ coating효과를 확인할 수 있다. 또한 자성재료인 MnZn ferrite를 TiO_2 에코팅하여 흡수대역폭과 흡수능을 향상시켰다.

$Al(OH)_3$ (a), MnZn ferrite(b), MnZn ferrite에 $Al(OH)_3$ 로 coating되어진 것(c)을 전자현미경으로 500배 확대하여 그림 3.10에 나타내었다.

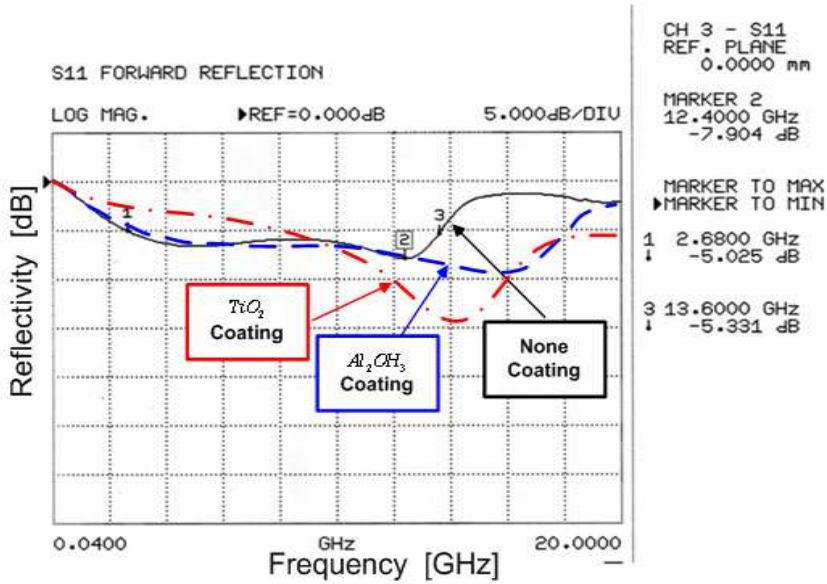


그림 3. 8 Al(OH)₃와 TiO₂의 coating에 따른 전파흡수체의 반사계수
Fig 3. 8 Reflection coefficient of the EM wave absorbers coated for Al(OH)₃ and TiO₂(sample thickness 2 mm).

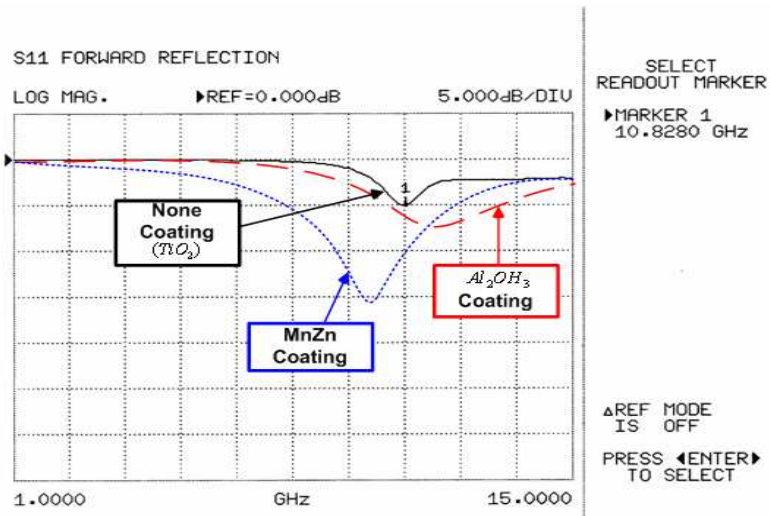
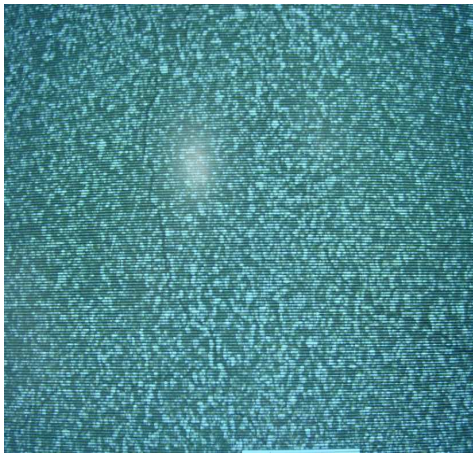
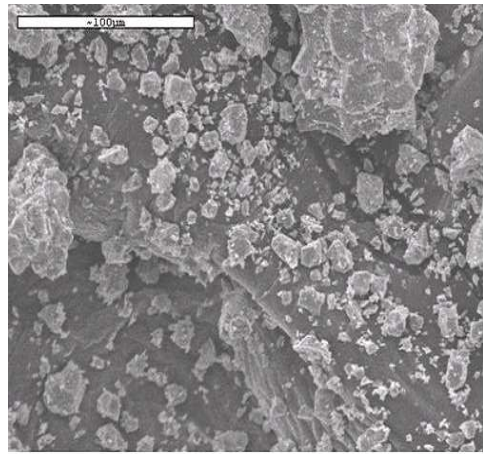


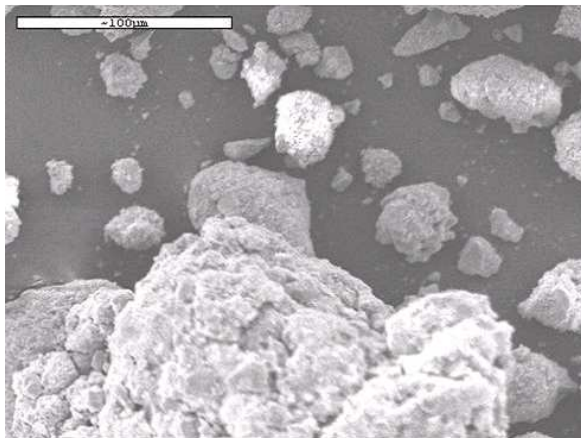
그림 3. 9 Al(OH)₃와 MnZn의 coating에 따른 전파흡수체의 반사계수
Fig 3. 9 Reflection coefficient of the EM wave absorbers coated for Al(OH)₃ and MnZn(sample thickness 2 mm).



(a) $\text{Al}(\text{OH})_3$



(b) MnZn ferrite



(c) coated MnZn ferrite

그림 3. 10 $\text{Al}(\text{OH})_3$ (a)와 MnZn(b) 및 coated MnZn(c)의 SEM분석

Fig 3. 10 SEM analysis of $\text{Al}(\text{OH})_3$ (a), MnZn(b) and coated MnZn(c).

3.6 paint형과 Spray형 전파흡수체의 전파흡수특성 비교

그림 3.11에서 전파흡수체의 제작공정에 있어서 기존의 paint를 붓이나 롤러를 이용하여 칠하는 방법과 spray형식으로 분사하는 방법을 이용하여 전파흡수체를 제작하고 전파흡수능을 비교분석 하였다.

그림 3.11에서 보여주는 바와 같이 spray형 전파흡수체는 paint형과 비슷한 흡수 특성을 보이며, 12.4 GHz에서 약 2 dB의 흡수능을 향상 시켰다.

spray형은 paint형에 비해 빨리 마르고 두께를 얇게 제작하기 용이하나 spray gun을 이용하여 도포해야하며 두께를 어느 정도 유지하기 위해서는 여러번 말리고 도포하기를 반복해야하는 제작상의 장단점이 있다.

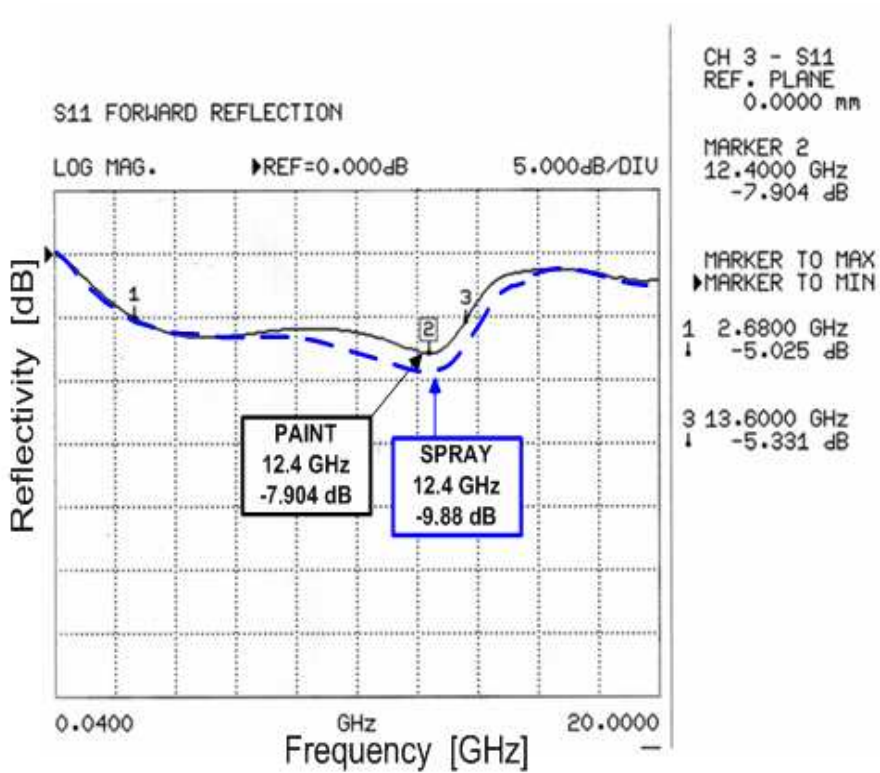


그림 3. 11 paint형과 spray형의 반사계수

Fig. 3. 11 The reflection coefficient of the paint-type and spray-type absorbers.

3.7 다층형 전파흡수체 구성에 의한 전파흡수성능 향상

사용주파수가 넓은 전파흡수체를 광대역형 전파흡수체라 한다. 다층형 전파흡수체는 광대역형 전파흡수체를 구현하기 위한 한 방법으로 이용되고 있으며 따라서 본 연구에서도 다층형 paint형 전파흡수체를 제작하여 전파흡수능의 광대역화를 꾀하였다.

어느 하한 주파수 f_L 이상의 주파수 전역에서 허용 반사계수 이하가 되는 특성을 갖는 전파흡수체를 초광대역형 전파흡수체라 부른다. 따라서 주파수비대역폭은 무한대가 되어 정의할 수 없다. 층의 수가 적은 전파흡수체에서는 이러한 특성이 얻어지지 않고, 보통 다층형 전파흡수체에 의해서 실현된다[8],[9]. 페라이트 전파흡수체를 광대역하기 위하여 페라이트 층 사이에 공기층을 삽입하거나 재료정수가 다른 페라이트 전파흡수체를 2개 이상의 층으로 조합한 모양, 또는 재료정수는 동일한 물질이나 전파흡수체의 형상을 공간적으로 변화시킴으로써 재료정수를 조작하여 페라이트 전파흡수체를 광대역화하고자 하는 시도가 이루어지고 있다.

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

그림 3.12은 조성비가 MnZn:Enamel paint=70:30 wt%인 두께 1 mm인 전파흡수체를 1층에 배치시키고, MnZn:Urethane paint=70:30 wt%인 두께 1 mm인 전파흡수체를 2층에 배치하여 2층형 전파흡수체를 구성하여 전파흡수능을 측정하였다. 10 dB이상을 흡수하는 대역폭이 약 2 GHz정도 넓어졌으며 흡수능 또

한 증가하였다.

그림 3.13은 MnZn:Urethane paint=70:30 wt%인 두께 1 mm인 전파흡수체를 1층에 배치시키고, MnZn ferrite에 TiO_2 코팅:Enamel paint=70:30 wt%인 두께 1mm인 전파흡수체를 2층에 배치하여 2층형 전파흡수체를 구성하여 전파흡수능을 측정하였다. 흡수대역폭의 향상과 정합주파수가 두 곳에서 나오고 있음을 확인할 수 있다.

그림 3.14는 조성비가 MnZn ferrite에 TiO_2 코팅:Enamel paint=70:30 wt%인 두께 1 mm인 전파흡수체를 1층에 배치시키고, TiO_2 에 MnZn ferrite코팅:Enamel paint=70:30 wt%인 두께 1 mm인 전파흡수체를 2층에 배치하여 2층형 전파흡수체를 구성하여 2층형 전파흡수체를 구성하여 전파흡수능을 측정하였다.

그림 3.15는 그림 3.14의 2층형 전파흡수체의 각층의 두께를 1.5 mm로 달리 하여 전파흡수능을 측정한 것이다. 흡수대역폭이 증가하였으며 특히, 적층두께를 제어하여 필요로 하는 주파수 대역인 X-band용 레이다 사용주파수인 9.375 GHz에서 20.4 dB의 전파흡수능을 얻을 수 있었다.

그림 3.16은 3가지 자성재료중 가장 저주파대역에서 흡수능을 가지는 sendust를 1층에 MnZn를 2층에 가장 고주파대역에서 흡수능을 가지는 Ba를 3층에 적층시키는 순서로 조성비가 Sendust:Enamel paint=70:30 wt%인 두께 1 mm인 전파흡수체를 1층에 배치시키고, MnZn:Enamel paint=70:30 wt%인 두께 1 mm인 전파흡수체를 2층에 배치하고 Ba:Enamel paint=70:30 wt%인 두께 1 mm인 전파흡수체를 3층에 배치하여 3층형 전파흡수체를 구성하여 전파흡수능을 측정하였다. 또한 각층의 두께를 2 mm로 달리하여 측정하였다. 흡수대역이 광대역화 되었으며 적층두께를 제어하여 필요로 하는 주파수 대역인 1.8 GHz에서 약 13 dB의 흡수능을 얻을 수 있었다.

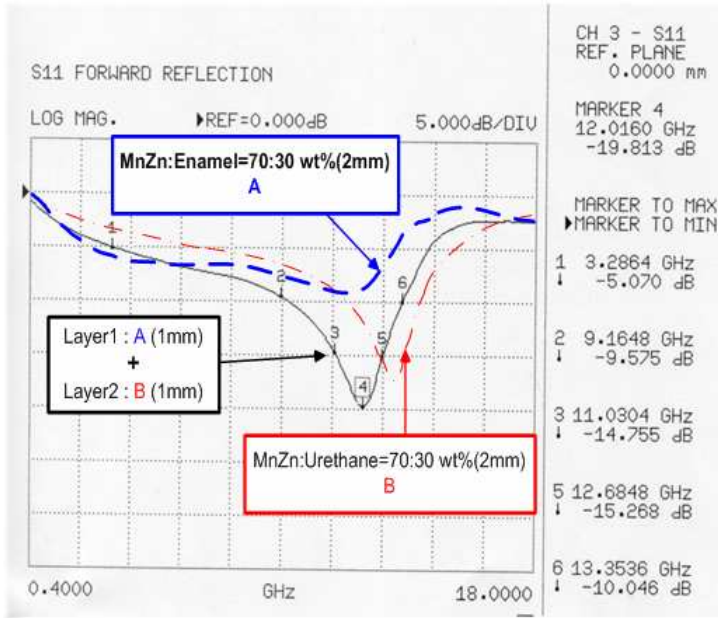


그림 3. 12 2층형 전파흡수체의 반사계수

Fig 3. 12 Reflection coefficient of the double-layer type EM wave absorbers (sample thickness 2 mm).

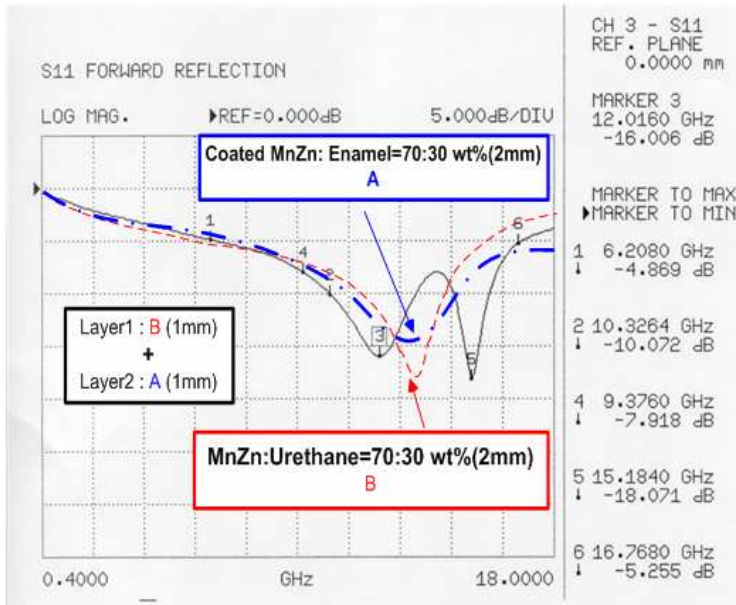


그림 3. 13 2층형 전파흡수체의 반사계수

Fig 3. 13 Reflection coefficient of the double-layer type EM wave absorbers.

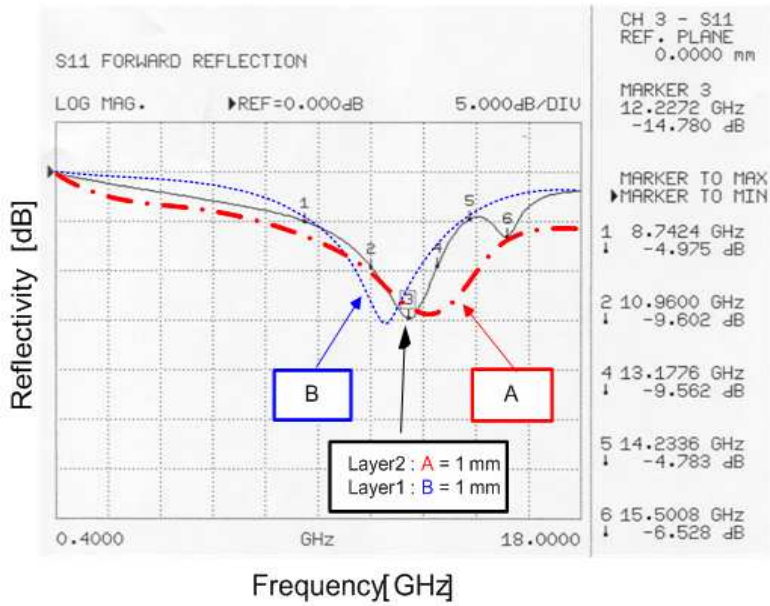


그림 3. 14 2층형 전파흡수체의 반사계수

Fig 3. 14 Reflection coefficient of the double-layer type EM wave absorbers.

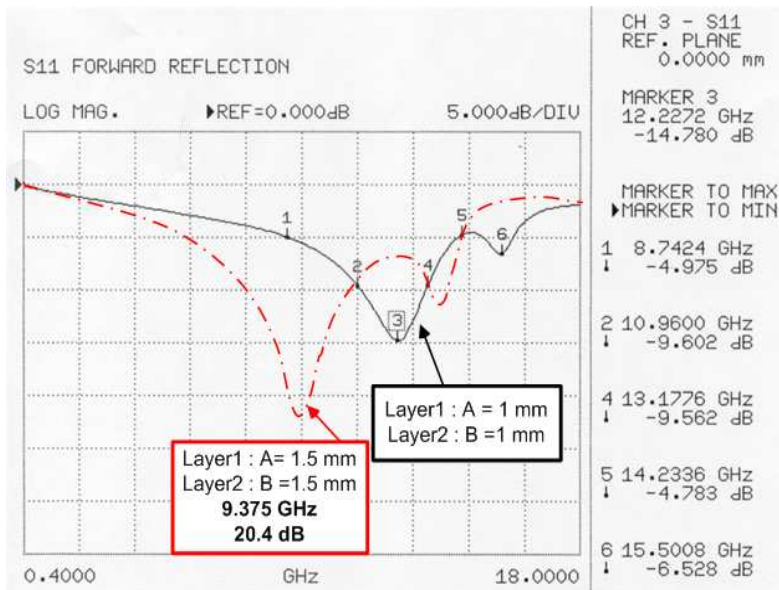


그림 3. 15 2층형 전파흡수체의 적층두께변화에 따른 반사계수

Fig 3. 15 Reflection coefficient of the double-layer type EM wave absorbers for various layer-built thickness.

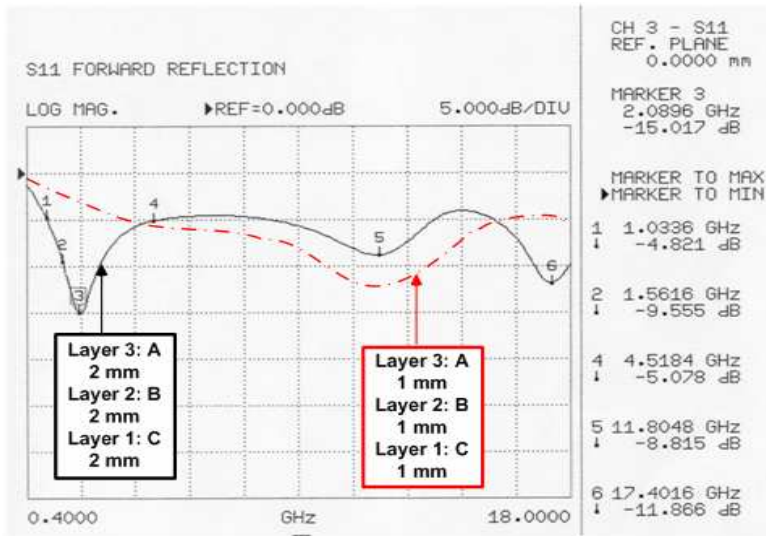


그림 3. 16 3층형 전파흡수체의 적층두께변화에 따른 반사계수

Fig 3. 16 Reflection coefficient of the trine-layer type EM wave absorbers for various layer-built thickness.

제 4 장 결 론

전자기기의 급격한 고주파화 추세를 감안하면 GHz 대역용 전파흡수체의 개발에 관한 연구는 매우 중요하다. 전파흡수체는 전파무향실의 벽이나 천정에 사용하거나 고층건물의 벽면이나 대형교량의 금속부재에 붙이므로 가능한 한 가벼운 것이 좋고 부착이 용이해야 한다. 따라서 박형화된 sheet형 전파흡수체 또는 paint형 전파흡수체가 적합하다. 따라서 본 논문은 지금까지 전파흡수체에 대표적인 재료로 사용되어 오던 MnZn ferrite를 사용하여 paint형 전파흡수체의 단층형(Single-layer type)에서의 전파흡수능 향상과 협대역인 것을 보완하는 방법으로서 $Al(OH)_3$ 를 MnZn ferrite에 코팅하는 방법과 2층형(Double-layer type)전파흡수체를 이용하는 방법으로 단층의 paint형 전파흡수체의 대역폭과 전파흡수능을 향상시켰다. 이를 위해 먼저 paint형 전파흡수체의 자성재료의 종류, paint의 종류에 따른 전파흡수능과 제작된 시편의 두께, Ferrite 평균입자크기, 조성비 등을 제어하며 시편의 전파흡수능, 복소투자율, 복소유전율, SEM, 등을 분석하였으며 단층형(Single-layer type)에서 전파흡수능 향상과 협대역인 것을 보완하는 공정으로 $Al(OH)_3$ coating과 다층형(multy-layer type)전파흡수체에 관한 연구를 통한 분석결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) MnZn Ferrite의 평균입자크기를 제어하여 전파흡수능을 향상 시켰다. 평균입자크기가 250 μm 일때 정합주파수 13.8 GHz에서 25 dB의 흡수능을 보였다. 평균입자크기 변화에 대하여 정합주파수가 저주파 대역으로 이동하는 약간의 차이를 보이면서, 전파흡수능이 입자크기가 일정하지 않은 MnZn에 비해 최대 17 dB까지 흡수능 향상을 보였다.
- (2) paint형과 Spray형의 전파흡수능을 비교하였다. 조성비와 두께가 같은 조건에서 Spray형이 paint형에 비해 정합주파수대에서 약 2 dB의 전파흡수능 향상을 보였으며, 주파수(400 MHz ~ 20 GHz)를 함수로 하는 반사계수 곡선은 거의 일치하고 정합주파수도 일치하였다.

(3) 조성비가 전파흡수능에 미치는 영향을 조사하였다. 제작된 전파흡수체의 시편 두께를 제어하여 정합주파수는 12.16 GHz로 맞추고 MnZn와 Enamel paint의 중량비(wt%)를 변화시켰을 때 MnZn:Enamel paint=60:40 wt%일 때 두께 1.88 mm에서 최대 흡수능 17.87 dB를 나타내는 조성비를 찾았다. 또한 두께가 증가함에 따라 전파흡수체의 특성에 따라 정합주파수는 저주파 쪽으로 이동함을 알 수 있었다.

(4) $Al(OH)_3$ coating과 TiO_2 coating이 paint형 전파흡수체의 전파흡수성능에 미치는 영향을 조사하였다. 조성비(MnZn:Enamel paint=70:30 wt%), 두께(2 mm)가 동일한 조건에서 $Al(OH)_3$ 가 20 wt%함유 되었을 때 정합주파수와 흡수능이 일치하였고, 흡수대역폭이 약 4 GHz 넓어졌다. 또한, 조성비(MnZn:Enamel paint=70:30 wt%), 두께(2 mm)가 동일한 조건에서 TiO_2 가 20 wt%함유 되었을 때 정합주파수의 이동이 있었고 전파흡수능은 약 7 dB향상되었다. 하지만 전파흡수대역은 좁아졌다.

(5) 다층 paint형 전파흡수체의 전파흡수성능에 미치는 영향을 조사하였다. 조성비(MnZn:paint=70:30 wt%), 두께(2 mm)를 고정시키고 지지재인 paint를 달리하여 1층에 Enamel paint, 2층에 Urethane paint를 사용한 전파흡수체를 2층형(Double-layer type)으로 적층한 결과 흡수대역폭 향상과 흡수능을 향상을 확인하였다. 또한 적층순서를 고려하여 X-band내에서 정합주파수가 낮은 주파수대역에 있는 흡수체를 1층에, 정합 주파수가 높은 주파수대역에 있는 흡수체를 2층에 배치하고 두께를 제어하여 X-band용 레이더 사용주파수인 9.375 GHz에서 20.4 dB의 우수한 흡수능을 보이는 전파흡수체를 설계 및 제작하였다.

실험결과 단층형(Single-layer type)에서 전파흡수능 향상과 협대역인 것을 보완하는 공정으로 $Al(OH)_3$ coating과 2층형(Double-layer type)전파흡수체에 관한 연구와 실험을 통해 전파흡수능과 대역폭의 향상을 기대 할 수 있음을 알게 되었다. 그러나 다층 적층의 경우 적층순서에 의한 전파흡수능과 정합주파수변화에 대해서 추후 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] 김동일, 전상엽, “EMI/EMC 대책용 광대역화 전파흡수체의 개발에 관한 연구”, 한국향해학회지 제15권 제4호, pp. 13-35, 1991. 12.
- [2] 김동일, 안영섭, 정세모, “레이다용 광대역 형 고성능 전파흡수체의 개발에 관한 연구”, 한국향해학회지, 제15권 제1호, pp.11-9, 1991.3
- [3] 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.
- [4] Y. Hashimoto, "The application of ferrite as an absorber", Jap. J. Appl. Phys., Vol. 6, No. 3, pp. 175-17, 1983.
- [5] Y. Naito, Electromagnetic Wave Absorber, Tokyo : New Ohm, 1987. 6.
- [6] 橋本修, “電波吸收体入門”, 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] 김동일, 이창우, 전상엽, 정세모, “초광대역특성을 갖는 정방향 페라이트 기둥 구조의 전파흡수체 설계법,” 한국향해학회지 제 19 권 제 2 호, pp.99-106, 1995.
- [9] Y. Naito et al., “AnFechoic chamber fitted with ferrite grid or ferrite multilayer electromagnetic wave absorbers,” EMC'94 ROMA, pp.229-234, Sep. 1994.
- [10] 김동일, 박지용, “광대역특성을 갖는 다층구조 페라이트 전파흡수체의 최적 설계,” 한국통신학회 부산·경남추계합동학술발표회, pp.58 -62, 1996.
- [11] David M. Pozar, *Microwave Engineering*, Addison-Wesley, 1990.
- [12] 김동일, 박지용, “광대역특성을 갖는 다층구조 페라이트 전파흡수체의 최적 설계,” 한국통신학회 부산·경남추계합동학술발표회, pp.58 -62, 1996.
- [13] 朴聖基, 마이크로파공학, 청문각, 1985.

발 표 논 문

학술지 게재논문

- [1] 김동일, 최정현, 최동한, 송재만, 정재현, “옷을 지지재로 사용한 paint형 MnZn와 NiZn 페라이트 전자파 흡수체 특성의 비교연구”, 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 전파 흡수체의 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, Sept. 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, Feb. 25~27. 2005.

국내 발표

- [9] 문상현, 신승재, 김동일, 송재만, 최정현, 김기만, "GHz 대역용 전파흡수체의 개발", 2004년도 한국항해항만학회 춘계학술대회 논문집, pp. 17-22, 2004. 4. 23.
- [10] 김동일, 최동한, 김기만, 정재현, 최정현, "옷을 지지대로 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, "paint형 전파흡수체에 관한 연구", 2005년도 제 1회 산업 기술연구소 학술강연회 논문집, pp. 9-18, 2005. 3. 29.
- [13] 정재현, 최정현, 김동일, 송재만, "Development of Electromagnetic Wave Absorbers with Alnico Magnets," 2005년도 제1회 산업기술

- 연구소 학술강연회 논문집, pp. 55-64, 2005. 3. 29.
- [14] 정재현, 김동일, 송재만, 최정현, “Sendust를 이용한 전파흡수체의 개발”, 2005년도 마이크로파 및 전파전파 학술대회 논문집, Vol. 28, No. 1, pp. 427-430, 2005. 5. 21.
- [15] 정재현, 김동일, 송재만, 최정현, “선박용 레이더의 허상 방지용 paint형 전파흡수체의 개발”, 2005년도 한국마린엔지니어링학회 전기학술대회논문집, pp. 350-355, 2005. 6. 23~25.
- [16] 최정현, 김동일, 송재만, 정재현, “Sendust를 이용한 휴대전화용 전파흡수체의 개발”, 2005년도 한국마린엔지니어링학회 전기학술대회논문집, pp. 356-361, 2005. 6. 23~25.
- [17] 최정현, 김동일, 송재만, 정재현, “paint형 전파흡수체의 개발”, 2005년도 추계 마이크로파 및 전파학술대회 논문집, Vol. 28, No. 2, pp. 317-320, 2005. 9. 24.
- [18] Jae Man Song, Dong Il Kim, Jeung Hyun Choi, Jae Hyun Jeung, Ki Man Kim, “Development of Electromagnetic Wave Absorbers with Hard Magnets,” 2005 Korea-Japan Microwave Workshop (KJMW-2005), pp. 103-106, Oct. 17-18, 2005.

感謝의 글

대학졸업 후 석사과정의 진학이 희미했던 목표를 뚜렷하게 재정립할 수 있는 계기가 되었습니다.

부족함을 깨달았을 때 떠나야 한다는 것이 아쉬움으로 남습니다.

석사과정에 진학하기에 부족했던 저를 거두어주시고 본 논문이 있기까지 세심한 지도와 관심을 기울여 주시며 이끌어 주신 김동일 지도교수님께 깊은 감사를 드립니다.

학문에 앞서 인성을 먼저 키워주신 교수님의 가르침을 잊지 않고 정직하고 성실하게 살아가겠습니다.

논문을 마무리할 수 있도록 지도해 주시고 심사를 맡아주신 조형래 교수님, 정지원 교수님, 여러 가지 조언으로 격려해주신 민경식 교수님, 김기만 교수님, 윤영 교수님, 산업기술 연구소의 송재만 박사님께 감사드립니다.

실험실에 오셔서 따듯한 정을 나누어주셨던 원영수 국장님, 박우근 부장님께도 감사드립니다.

박사학위를 받게 된 실험실의 만형 동한이형님께 축하드리며, 실험실의 행동대장으로 많은 조언해주신 창목이형님, 전공공부에 많은 도움을 준 자신감 넘치는 도연이형, 좋은 친구이자 선배 루이에게 감사드립니다. 같이 동고동락하며 석사과정을 무사히 마치게 된 동기 신자, 재현, 대훈, 오 선생님, 그리고 후배 재현과 재민, 실험실 살림꾼 상미와 함께 졸업의 기쁨을 같이 하고 싶습니다. 특히, 친구이자 후배들인 윤석이와 승훈이에게 선배로서 도움이 되어주지 못하고 도움만 많이 받고 졸업하게 되어 미안한 마음과 고마운 마음을 전합니다.

졸업하기까지 든든한 후원자로서 지치고 힘들 때 마다 힘이 되어주신 부모님께 감사드립니다.

이제 인생에 있어서 또 하나의 시작의 위해 한 걸음 나아가려 합니다. 결코 쉽지는 않겠지만 제 주위의 많은 우인들이 있기에 도전할 자신이 생깁니다.