

工學碩士 學位論文

도전성 섬유를 이용한 전파흡수체에
관한 연구

A Study on EM Wave Absorbers Using
Conductive Cloth

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

吳 京 珍

本 論文을 吳京珍의 工學碩士
學位論文으로 認准함

委員長：工學博士 趙 炯 來 (印)

委 員：工學博士 鄭 智 元 (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

吳 京 珍

목 차

Nomenclatures	v
Abstract	vi
제 1 장 서론	1
1.1 연구 배경 및 목적	1
1.2 연구 내용 및 방법	3
제 2 장 전파흡수체의 이론 해석	5
2.1 전송선로 이론에 의한 전자파 흡수해석	5
2.1.1 평면파의 전자파	5
2.1.2 분포정수선로	9
2.1.3 전송선 이론	10
2.2 1층형 전파흡수체	14
2.3 2층형 전파흡수체	18
제 3 장 도전성 섬유의 특성	22
3.1 도전성 섬유	22
3.2 도전성 섬유의 전자파흡수원리	23
3.2.1 전자파차폐 성능	23
3.2.2 전파흡수에 관한 분석	25
제 4 장 도전성 섬유를 이용한 전파흡수체의 재료 및 제작	29
4.1 섬유시트 및 전파흡수 재료	29
4.1.1 알루미늄 도금 섬유시트의 물리적 특성	29
4.1.2 금 도금 섬유시트의 물리적 특성	31
4.1.3 표면비 저항 측정	34

4.1.4 전기전도도 측정	34
4.1.5 4단자법에 따른 면저항치의 측정	35
4.1.6 전자과차폐효율 측정	35
4.2 전파흡수체 제작	36
4.2.1 제작된 전파흡수체 구조도	36
4.2.2 전파흡수체와 에폭시 수지의 혼합비율	36
제 5 장 도전성 섬유를 이용한 전파흡수체의 측정과 특성 평가	37
5.1 전파흡수체의 전파흡수체능 측정 및 재료정수 측정	37
5.1.1 전파흡수체의 전파흡수능 측정	37
5.1.2 전파흡수체의 재료정수 측정	38
5.2 알루미늄을 도금한 섬유의 투자율과 유전율 변화	40
5.3 전파흡수체 두께 변화에 따른 전파흡수능 변화	41
5.3.1 섬유를 첨가하지 않을 때 두께 변화에 따른 전파흡수능 변화	41
5.3.2 섬유를 전파흡수체 전자파 투과면에 부착할 때 두께 변화에 따른 전파흡수능 변화	44
5.3.3 섬유를 전파흡수체 중간층에 첨가할 때 전체 두께 변화에 따른 전파흡수능 변화	48
5.3.4 알루미늄 도금섬유의 두께(층수) 변화에 따른 복합전파흡수체의 전파흡수능 변화	52
제 6 장 결론	55
참고 문헌	56

Nomenclatures

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

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

Abstract

In this thesis, EM wave absorbers were fabricated with MnZn, NiZn, Ba ferrites, and Sendust on the basis of very thin conductive fibers. The purpose of this research is to develop a complex EM wave absorber with superior EM wave absorption based on conductive fibers.

A conductive fiber which has shield property of 20~40 dB in GHz was used in this work. The absorption ability of EM wave absorber can be increased by using the conductive fibers, because some absorption and return losses can be occurred by the conductive fibers. Moreover, the conductive fibers are of light weight, thin thickness, and can be used as binders to fabricate complex EM wave absorbers, therefore it is possible to apply them to the fabrication of EM wave absorber without influencing their weight and volume. Complex EM wave absorbers were made by pasting a sheet of fiber on the backside of existing absorber using epoxy paint which is flexible and not fragile.

In this thesis, two types of fibers, (one is gold-plated with about $0.1 \Omega / \text{cm}^2$ surface resistance, and the other is alumina-plated with $60 \Omega / \text{cm}^2$ surface resistance), are used, and some EM wave-absorbing materials with high absorption ability, such as MnZn, NiZn, Ba ferrite, and Sendust are used.

As the experimental results, the gold-plated fibers couldn't increase absorption ability but could be used as EM wave shielding materials because of their high shielding efficiency, light weight, and thin thickness (about 0.09 mm).

Comparing the EM wave absorbers composed of the alumina-plated sheet with ones fabricated without the alumina-plated sheet, the former improve the absorption abilities due to the reflection and

absorption losses resulted from the alumina-plated sheet itself. Shielding efficiency of alumina-plated sheet is not better than the gold-plated sheet. However, it can be used as EM wave absorbers materials because of its average shielding efficiency of 20 dB to the EM wave absorbers in GHz band, and its thickness is 0.25 mm, weight is light as well as the gold-plated sheet.

Fabricated MnZn ferrite, Ba ferrite, NiZn ferrite, and Sendust EM wave absorbers are useful as a EM wave absorber for S-Band, Ku-Band and C-Bnad, respectively.

This thesis shows that EM wave absorber fabricated with conductive fibers can be a candidate of EM wave absorber with superior EM wave absorption ability for GHz band and do not allow permeation of unwanted EM waves.

제 1 장 서 론

1.1 연구배경 및 목적

사회의 정보화가 고도 이행에 따른 전자 및 정보, 통신기기의 사용이 급증하고 정보량의 증가에 따른 가속적인 고주파화가 이루어지고 있으며 원하지 않은 전자파의 방출이 급속히 증가됨에 따라 전자기기의 오동작을 초래하는 등 경제 손실을 가져오고 있다. 최근 전자파에 의한 간섭 및 인체유해성 등 피해 사례가 입증 확인되고 그 피해의 심각성 인식이 확대됨에 따라 이에 대한 규제도 점차 강화되는 추세이다[1~3].

이와 같은 전자/정보화 환경에서 전자파 방사는 심각한 전자파 장해를 유발시키고 있는데 이를 산업적 측면과 환경적 측면으로 나눌어 볼 수 있다.

산업적 측면에서 불필요한 전자파의 방출은 우선 전자기기간 오동작을 유발하는 사례가 빈번하여 경제적, 인적 피해를 초래하기 때문에 세계 각국에서는 전자파 방사에 대한 규제체도를 갖고 있는데 [3] [4] 국제적으로 CISPR, 미국에서는 FCC, ANSI 등의 규제를 만들게 되었고 한국에서는 수출에 대비하여 전자통신용 장비의 전자파장해(EMI: Electromagnetic Interference)/전자파양립성(EMC: Electromagnetic Compatibility) 규제를 강화하고 있다. 특히 EU는 1996년부터 역내에서 거래되는 모든 전자기기에 대하여 전자파 규격의 선언을 의무화하고 있으며(CE 마크제도)FCC, CISPR, EC 등은 각종 국제 전자파 규격 표준 및 규제를 강화, 확대해 나가고 있다[3]. 상품에 대한 규격 의무화는, 제품생산 업체의 입장에서 보면 규격을 통과하기 위한 별도의 기술개발 및 비용을 지불해야하기 때문에 기존의 유지 및 신규 시장 진입에 대한 새로운 무역 장벽으로 인식되고 있다.

환경적 측면에서 볼 때 전자파에 의하여 기인하는 것으로 추정되는 발병사례에 대한 언론의 보도가 이어지면서 인체피해에 대한 우려가 사회적으로 점차 증가하고 있다. 이에 따라 각국에서는 인체에 미치는 전자파의 피해를 줄일 수 있는 전자기기 사용상의 수칙 발표와 더불어 전자파에 대한 인체보호 규제 권

고안을 마련해 놓고 있는데 유럽에서는 이 분야도 이미 강제 규정화되고 있는 추세이다(TCO'99, Blue Angel, White Swan). 한국에서는 정통부는 전자파 인체보호기준, 전자파 흡수율(SAR)측정기준 등 기술기준을 재정하고 이에 대비하고 있다[5][6].

전자파장해(EMI)/전자파양립성(EMC) 대책으로는 여러가지 방법이 있으나 경우에 따라 전파흡수체거나 전자파차폐 방법이 매우 유용하고 효과적인 것으로 평가받고 있다.

전파흡수체란 전자파의 반사를 저감하기 위한 것으로서, 당초에는 적의 레이더에 잠수함이나 비행기가 탐지되지 않도록 하는 등의 군사 장비면에서의 요구나 전파암실을 구축하기 위해 이용하는 것이 주된 사용 목적이었다. 그러나 근래에 들어서는 전자렌지(Microwave oven)나 컴퓨터 등 우리의 주변에서 전자파가 많이 이용되고 있으며, 이들 전자기기에서 방사된 불요 전자파가 다른 전자기기에 악영향을 주고 있다. 이와 같이 전파환경이 악화되는 상황에서 각종 전파흡수체를 필요로 하는 경우가 증가되고 있다[7].

각국에서 전파흡수체에 대한 연구가 활발히 진행되고 있고 그 요구가 점점 높아지고 있다. 현재 진행되어지고 있는 것을 포함하여 열거하면 아래와 같다. 박형, 경량 내 환경 성능 광대역, 광각도 성능 양 편파 대응 밀리미터파 대응으로 볼 수 있다. 현재까지 연구결과를 종합하면 ①전파장해방지 대책용 전파흡수체 ②레이더 허상방지 대책용 전파흡수체 ③전파암실용 전파흡수체 ④밀리미터파대응 전파흡수체로 나눌 수 있다. 이와 같이 부동한 용도의 전파흡수체를 제작하자면 그에 연관된 흡수 재료에 대한 개발이 매우 중요하다. 지금까지 개발된 전파흡수 재료의 종류는 다양하지만 전파흡수 기구(원리)에 따라 세 가지로 분류할 수 있다. ①도전손실재료 ②유전손실 재료 ③자성손실 재료이다. 도전성 손실 재료로는 도전성섬유를 부직포 형태로 짜서 만든 베나 상화인듐 방울을 증착한 유전체 시트가 있다. 유전손실 재료로서는 카본 입자를 혼입한 고무시트, 그래파이트(흑연) 함유 발포 폴리스티로폼, 카본 함유 발포 우레탄 등이 있다. 자성손실 재료로는 페라이트가 가장 대표적이다. 근년에 전파흡수체에 많이 사용하고 있는 MnZn페라이트, NiZn페라이트, Ba페라이트, Sr페라이트, Sendust 등 재료를 기초로 많은 연구가 진행 되었다. 예를 들면 입자 크기에 따른 전파흡수능 변화, 그리고 전파흡수체의 제작구조, 제작온도, 같지 않은 재

료의 복합 비율 등 부동한 각도에서의 전파흡수능 변화 연구이다.

본 논문의 목적은 이러한 요구 성능을 만족시키기 위해 다양한 각도에서의 연구개발이 이루어지고 있는데 비교하여 기존에 사용하고 있는 전파흡수체에 전자기 차폐에서 많이 사용되고 있는 전도성 섬유와 결합하여 복합형 전파흡수체를 제작하고 그 성능 특성에 대해 초보적으로 연구하는데 있다.

1.2 연구 내용 및 방법

본 논문에서 도전성 극 세(직경이 30 μm 이하) 섬유를 기존에 사용하고 있는 전파흡수재료(MnZn페라이트, NiZn페라이트, Ba페라이트, Sendust)와 복합하여 전파흡수체를 제작하였다.

도전성 극 세 섬유는 전자파차폐재로 많이 쓰이고 중점적으로 연구하고 있는 항목으로 이번 연구에 쓰이는 섬유는 GHz대역에서 차폐 효율이 평균 30dB이상으로 거의 모든 전자파를 차단하여 투과되는 전자파가 기본상 없게 한다. 그리고 섬유에 전자파가 입사 할 때 전자파에 대한 섬유자체 흡수, 반사손실이 일어나서 도전성 섬유를 사용함으로써 전파흡수능에 다소나마 영향이 미친다. 또한 섬유 자체도 복합전파흡수체의 좋은 지지재 작용을 하며 경량이고 얇아 제조된 전파흡수체의 무게나 체적 변화가 크게 나타나지 않으므로 흡수체의 실제 제작사용에도 가능하다.

본 논문에서는 두 가지 섬유 샘플(표면비저항은 금도금을 한 시트는 약 0.1 Ω/cm^2 이고 알루미늄 도금을 한 시트는 약 60 Ω/cm^2 이다.) 을 사용하였고 기본 전파흡수체로는 전자파에 대한 자기적 손실이 큰 물질로 알려진 MnZn페라이트, NiZn페라이트, Ba페라이트, Sendust 재료를 사용하였다[11].

복합전파흡수체를 제작 할 때 점착 지지재로는 에폭시 페인트(유연성이 좋고 취약하지 않음)사용하고 도전성 섬유는 기본 흡수체의 한 면(투과면), 혹은 중간에 끼워 제작한다. 이렇게 제작된 전파흡수체들의 전파흡수능을 측정 비교였다. 이런 측정 분석을 통하여 결론을 얻었다.

제 2 장 전파흡수체의 이론해석

2.1 전송선로 이론에 의한 전자파 흡수해석

전파흡수체의 흡수원리와 설계 방법을 설명하기 위하여 공간을 전파하는 평면파의 해석이 필요하다. 하여 먼저 평면파와 그 전파흡수에 대하여 간단히 설명하련다.

2.1.1 평면파의 전자파 흡수

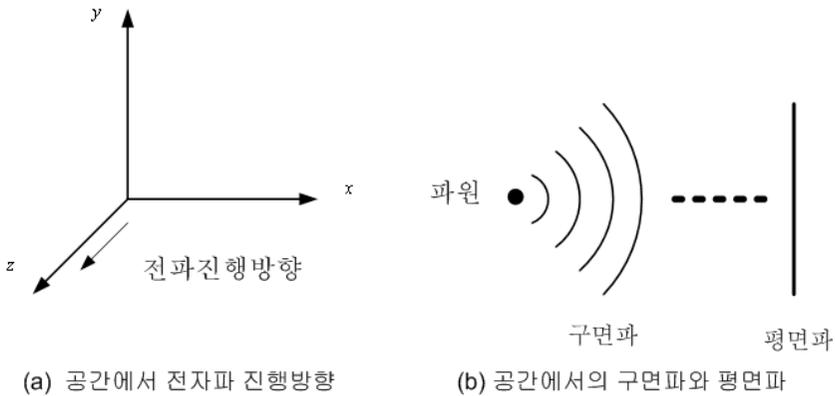


그림 2.1 평면파와 등위상면

Fig. 2.1 Plane wave and isopotential surface: (a) EM wave incident direction in free space, (b) spherical and plane wave.

그림 2.1에 나타내는 바와 같이 전파원으로부터 공간에 방사된 전자파는 공간을 전파함에 따라 위상 면이 직선상인 평면파로 된다. 여기서 z 방향으로 전파하는 평면파에 관해서 다음의 맥스웰방정식으로부터 그 전자계를 검토하면 아래 식과 같다.

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

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

즉, z 방향으로 전파하는 평면파이기 때문에, $\frac{\partial}{\partial t}$ 및 $\frac{\partial}{\partial z}$ 이외는 0(zero)인 것을 고려하면 식 (2.1)은 다음의 두 개의 스칼라 방정식으로 분해될 수 있다.

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

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

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

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

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

여기서 ε_0 과 μ_0 는 각각 자유공간의 유전율과 투자율이다.

위식으로부터 E_y 및 H_y 에 관한 1차원의 파동방정식 (2.7)을 각각 얻을 수 있다.

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

여기서, 시간인자를 $e^{j\omega t}$ 라 하고 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 여기서는 그림 2.2(a)와 같이 $+z$ 방향으로 전파하는 파를 고려하고 있기 때문에 진행파($E_+ e^{-\gamma_0 z}$)만을 선택한다. 또한 $\gamma_0 = j\omega \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}$ 라 놓으면

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

이 된다. 마찬가지로 H_x 성분을 도출할 수 있다.

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

더욱이 이러한 평면파의 전계성분과 자계성분에 관해서 그 방향도 고려하여

비를 구하면 일정한 값이 된다. 자유공간에서 이 값은 약 375.7Ω이 되고 파동 임피던스라 부른다.

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

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

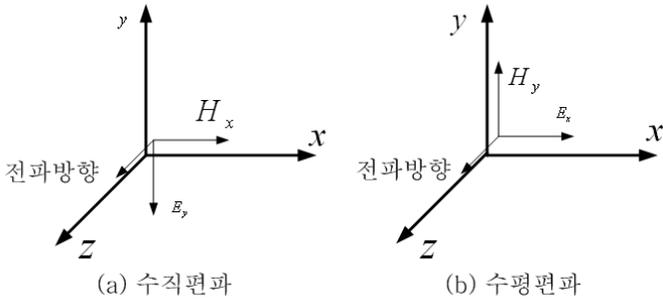


그림 2.2 평면파의 전자계성분

Fig. 2.2 Polarization of an electromagnetic plane wave: (a) perpendicular polarization, (b) parallel polarization.

평면파가 자유공간을 전파하는 경우에는 거의 감쇄하지 않지만 그림 2.3에서 보듯이 손실유전체나 손실자성체와 같은 매질을 전파하는 경우에는 그 재료의 전기적 특성에 따라 크게 감쇄한다.

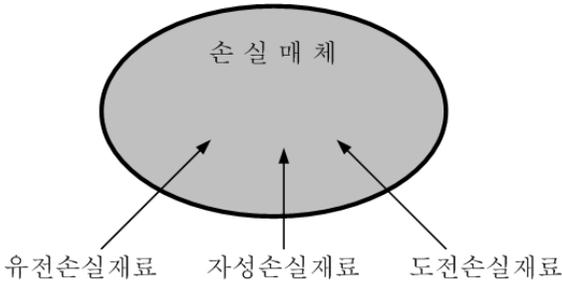


그림 2.3 손실매질

Fig. 2.3 Lossy materials.

즉 손실 매질에서는 유전율 및 투자율이 $\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''$ 및 $\mu = \mu' - j\mu''$ 도 복소수가 되고 또 도전율 σ 가 유일한 값을 가지고 있기 때문에 맥스웰방정식은 식 (2.3)~ 식 (2.6)에 대응해서 다음과 같은 스칼라 방정식으로 분해할 수 있다.

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

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

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

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

이로부터 수평파의 감쇄상태를 알 수 있다.

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

다음의 $n^2 = \omega^2 \varepsilon \mu - j\omega \sigma \mu (= -\gamma^2)$ 라 하고 또한 편의상 $n^2 = (\beta - j\alpha)^2$ 라고 복소수로 정의하면 이 파동방정식은 다음과 같이 표현된다.

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

여기서, β 및 α 는 각각 위상정수 및 감쇄정수라 하며 전자파의 감쇄에는 이 α 가 크게 영향을 준다. 예를 들면 앞에서 나타낸 바와 같이 ε 와 μ 가 모두 실수고 σ 가 0인 경우에는 α 는 0이 되어 전자파는 감쇄하지 않는다. 또한 $\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''$, μ (실수) 및 $\sigma=0$ 인 경우에는 n^2 은 식 (2.17)이 된다.

$$n^2 = \omega^2 \varepsilon \mu \quad (2.17)$$

이것을 α 에 관해서 풀면 다음 식으로 나타내어지고 ε'' 가 존재함으로써 α 는 유한의 값이 되어 전자파는 감쇄하게 된다.

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

이상의 이론으로부터 전자파는 손실매질 중에 있어서 ε'' , μ'' 과 σ 의 효과에 의해 감쇄하는 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 이때의 단위면적당의 전파흡수에너지 $P[W/m^2]$ 는 전계 E 와 자계 H 를 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

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

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

그러나 고주파에 있어서는 식 (2.19)에 나타내는 바와 같이 ε'' 과 σ 을 나누어서 설명할 수 없기 때문에 어느 쪽의 손실이 지배적인지에 따라 도전성 손실 재료가 되는지 유전 손실재료인지를 분류하고 있다.

$$n^2 = \omega^2\varepsilon'\mu - j\omega^2\mu\varepsilon_t \tag{2.19}$$

여기서

$$\varepsilon_t = \varepsilon'' + \frac{\sigma}{\omega}$$

2.1.2 분포정수선로

평면파의 전파흡수현상을 구체적으로 해석하기 위하여 분포정수회로 원리를 도입하였다. 그림 2.4는 일반적인 전송선로의 등가회로이고 ΔZ 구간은 분포정수선로(미소구간)의 등가회로이다. 단위 길이 당 저항 $R[\Omega/m]$, 인덕턴스 $L[H/m]$, 용량 $C[F/m]$, 컨덕턴스 $G[S/m]$ 을 가지는 분포정수선로의 미소구간 dz 에 대한 등가회로를 나타내고 있다.

$$V = (R + j\omega L)dzI + (V + dV) \tag{2.20}$$

$$I = (G + j\omega C)dz(V + dV) + (I + dI) \tag{2.21}$$

dz , dV 가 극히 작은 것을 고려하면 다음 식이 얻어진다.

$$\frac{dV}{dz} = -(R + j\omega L)I \tag{2.22}$$

$$\frac{dI}{dz} = -(G + j\omega C)V \tag{2.23}$$

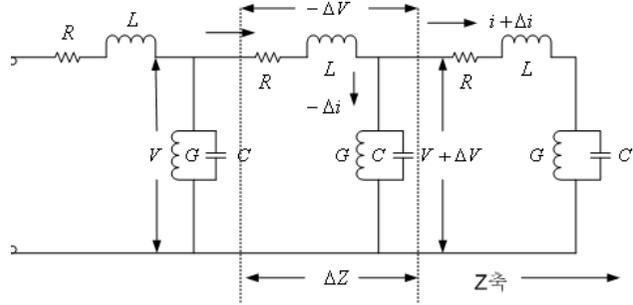


그림 2.4 일반적인 분포정수선로의 등가회로

Fig. 2.4 Generalized equivalent circuit made of distributed elements.

나아가서 다음의 파동방정식 형태의 V 또는 I 에 관한 2계선형 미분방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{d^2 V}{dz^2} = (R + j\omega L)(G + j\omega C) V \quad (2.24)$$

$$\frac{d^2 I}{dz^2} = (R + j\omega L)(G + j\omega C) I \quad (2.25)$$

그리고 이 미분방정식을 풀면 일반적으로 잘 알려진 전압, 전류의 기본식을 유도할 수 있다.

$$V = V_+ e^{-\gamma z} + V_- e^{+\gamma z} \quad (2.26)$$

$$I = \frac{V_+}{Z_C} e^{-\gamma z} - \frac{V_-}{Z_C} e^{+\gamma z} \quad (2.27)$$

여기서 V_+ 및 V_- 는 진폭계수이고, 첨자는 z 의 정 방향 및 부 방향으로 전송되는 파를 나타내고 있다. Z_C 는 이 선로의 특성 임피던스이며 미분방정식에서 다음 식이 얻어진다.

$$Z_C = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (2.28)$$

γ 는 전파정수이며 감쇄정수는 α , 위상정수는 β 이면

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (2.29)$$

으로 나타낼 수 있다.

2.1.3 전송선 이론

아래에 위에서 설명한 분포정수선로의 해와 맥스웰방정식으로부터 도출한 평면파의 해를 대응시킨다. 즉 식 (2.11)~(2.14)은 식 (2.22), (2.23)은 같은 형태이고 (전압과 전류), (전계와 자계)는 아래 표와 같은 대응 관계가 있고, 평면파를 해석할 때에는 분포정수선로로 치환해서 검토할 수 있다.

표 2.1 평면파와 분포정수 선로의 대응

Table 2.1 Plane wave and transmission line with distributed elements.

$V \leftrightarrow E$	$R \leftrightarrow \omega \mu''$	$L \leftrightarrow \mu'$
$I \leftrightarrow H$	$G \leftrightarrow \sigma + \omega \epsilon''$	$C \leftrightarrow \epsilon'$

이들의 대응 관계로부터 평면파의 파동임피던스와 전파정수에 관하여 식 (2.28)에 의하여 분포정수회로에서의 특성임피던스가 구해지므로 이것에 대응하도록 표 2-1을 참고하여 매질의 각 전기적인 정수를 대입하면 아래식과 같다.

$$Z_C = \sqrt{\frac{\mu' - j\mu''}{\epsilon' - j(\epsilon'' + \frac{\sigma}{\omega})}} \quad (2.30)$$

식 (2.19)에 나타낸 것처럼 ϵ'' 을

$$\epsilon'' + \frac{\sigma}{\omega} \rightarrow \epsilon'' \quad (2.31)$$

로 치환하면 Z_C 는 아래 식과 같이 고쳐 쓸 수 있고 선로의 특성임피던스 Z_C 는 앞에 나타낸 평면파의 파동임피던스가 된다.

$$Z_C = \sqrt{\frac{\mu' - j\mu''}{\epsilon' - j\epsilon''}} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (2.32)$$

선로의 전파정수에 관해서도 ϵ'' 에 이미 바꾸어 놓은 식 (2.31)을 사용하면

$$\gamma = j\omega \sqrt{\epsilon \mu} \quad (2.33)$$

가 되며 평면파에서의 전파정수와 같게 됨을 알 수 있다.

공기 중에서는 ϵ' , μ' 의 값은 1이고 ϵ'' , μ'' 의 값은 0이므로

$$\epsilon = \epsilon_0 \quad (2.34)$$

$$\mu = \mu_0 \quad (2.35)$$

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

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi \cong 377\Omega \quad (2.36)$$

식 (2.32)를 식 (2.36)으로 정규화(normalization)시키면

$$z_c = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \quad (2.37)$$

이 처럼 소문자로 나타내기도 한다.

또한 진공중과 임의의 매질에서 전파정수는 각각

$$\gamma_0 = j\omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \quad (2.38)$$

$$\gamma = j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad (2.39)$$

로 되어 분포정수선로 상의 파라미터 R, L, C, G 을 전자장 Parameter로 변환시킬 수 있다.

전기회로 내에서 전력을 소비하는 역할을 하는 것은 저항 R 과 컨덕턴스 G 이다. 유전율 $\epsilon(=\epsilon' - j\epsilon'')$ 과 투자율 $\mu(=\mu' - j\mu'')$ 에 주목하여 보면 저항 R 과 컨덕턴스 G 에 대응하는 것은 각각의 복소 성분 μ'' 과 ϵ'' 로서 L 과 C 는 무효손실이며 R 과 컨덕턴스 G 는 유효손실이 된다. 이것은 회로이론에서 무효전력과 유효전력의 벡터 합이 피상전력이 되는 것으로 이해 할 수 있다. 많은 전파흡수체는 도체금속판의 앞에 적당히 얇은 재료를 한 장 또는 여러 장을 배치하여 실현시킨다. 전자파의 입사 방향에서 보면 공기층과 전파흡수체 층으로 놓여진 것으로 된다. 여기서 사용된 재료정수는 투자율 $\mu(=\mu' - j\mu'')$ 와 유전율 $\epsilon(=\epsilon' - j\epsilon'')$ 을 가지고 있다. 이 들 재료정수를 표2-1에 적용하면 분포정수회로화 할 수 있다.

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

식을 쌍곡선함수로 표현하여 분포정수회로 임의의 점 d 에서 임피던스는

$$Z(d) = \frac{V(d)}{I(d)} = Z_C \frac{Z_L + Z_C \tanh \gamma d}{Z_C + Z_L \tanh \gamma d} \quad (2.40)$$

가 된다.

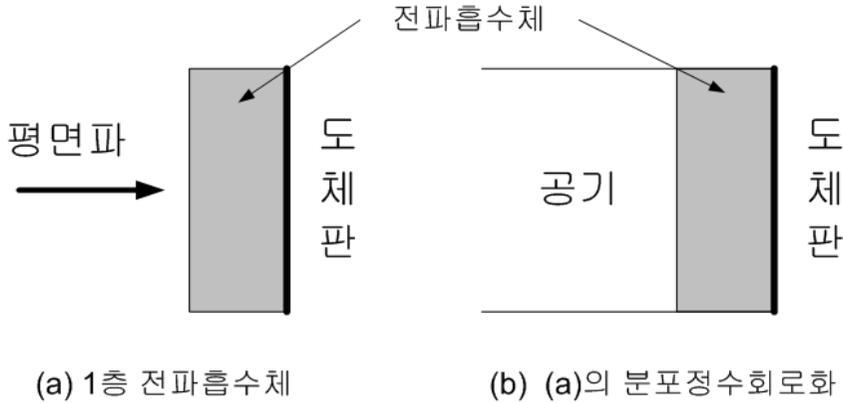


그림 2.5 전파흡수의 기본 구성

Fig. 2.5 Basic structure for EM wave absorption: (a) one-sheet EM wave absorber, (b) circuit diagram with distributed elements.

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

$$Z_L = Z_C \tanh \gamma d \quad (2.41)$$

가 된다. 여기서 d 는 전파흡수체의 두께에 해당되며 Z_C 는 전파흡수체 특성임피던스이다. 따라서 식 (2.39)에 식 (2.32), (2.33)을 적용하면 수전단에서 두께 d 에 떨어진 전파흡수체 표면에서의 임피던스는

$$Z_L = Z_C \tanh \gamma d = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \tanh(j\omega \sqrt{\epsilon\mu})d \quad (2.42)$$

정규화(normalization) 시키면

$$Z_{in} = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tanh(j\omega \sqrt{\epsilon_r \mu_r})d \quad (2.43)$$

이 된다.

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

전압과 전류 반사계수(Reflection coefficient)는

$$\Gamma_V(z) = \frac{V^-}{V^+} e^{-2\gamma z} \quad (2.44)$$

$$\Gamma_I(z) = \frac{V^-}{V^+} e^{-2\gamma z} = -\Gamma_V(z) \quad (2.45)$$

로 정의되고 $z=0$ 에서는

$$\Gamma_V(z) = \frac{V^-}{V^+} = \frac{Z_L - 1}{Z_L + 1} \quad (2.46)$$

따라서 임의의 점 x 에서 부하단을 본 임피던스는

$$Z_{in} = \frac{V(x)}{I(x)} = Z_0 \frac{1 + \Gamma(x)}{1 - \Gamma(x)} \quad (2.47)$$

정규화 시키면

$$z_{in} = \frac{Z_{in}(x)}{Z_0} = \frac{1 + \Gamma(x)}{1 - \Gamma(x)} \quad (2.48)$$

또 반사계수를 정규화 임피던스로 나타내면

$$\Gamma(x) = \frac{z_{in} - 1}{z_{in} + 1} \quad (2.49)$$

이 된다. 반사계수 Γ 는 0~1까지의 값을 갖는데 전파흡수체에서는 Γ 가 적을수록 전파의 흡수능이 뛰여 난다고 볼 수 있다. 가령 Γ 가 극단적으로 0이면 무반사이므로 전자파 에너지의 완전 흡수가 일어나고 Γ 가 1이면 완전반사로 전파흡수는 일어나지 않는다[13].

2.2 1층형 전파흡수체

여기에서 우선 전파흡수체로서 구조가 가장 간단한, 후면에 금속을 붙여 감싼 1층 구성 전파흡수체에 대하여 그 흡수원리 및 설계법을 설명하련다.

2.2.1 1층형 전파흡수체의 흡수원리

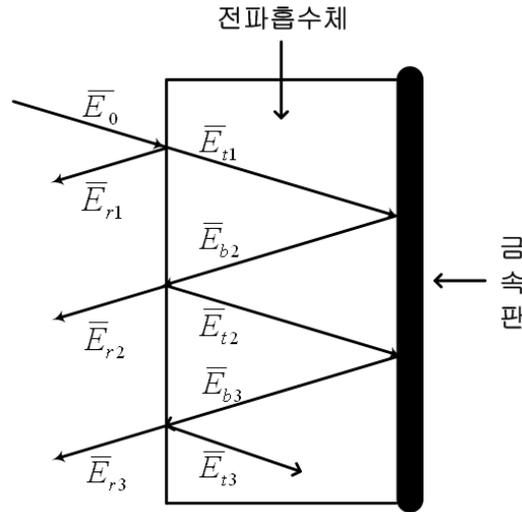


그림 2.6 1층형 전파흡수체의 전파흡수원리

Fig. 2.6 Fundamental principle of one-sheet EM wave absorber.

그림 2.6에서처럼 1층형 전파흡수체는 흡수체의 후면에 금속판을 붙이고 그것으로부터의 반사파와 흡수체 전면으로부터의 반사파의 진폭 및 위상을 조절하여 반사파를 저감시키는 형태로 구성된 흡수체이다. 전파가 나아가는 순서에 따라 아래와 같이 설명할 수 있다.

전파흡수체에 전계 E_0 의 전파가 입사하면 그 전면에서 E_{r1} 이 반사되고 나머지 E_{t1} 은 흡수체 내부에 투과한다.

내부로 투과한 파는 흡수체의 감쇠정수 α 에 의하여 지수 함수적으로 감쇠한다.

흡수체의 두께가 얇기 때문에 후면의 금속판에 도달한 전파의 전계의 크기가 충분히 작아지지 않는기 때문에 재차 금속판에서 완전 반사된다.

반사된 파는 다시 흡수체 내에서 감쇠하면서 후진하여 전계 E_{b2} 가 흡수체 표면에 도달한다.

이 후진한 전계 E_{t2} 는 표면의 경계면에서 부분적으로 반사된 E_{t2} 로서 흡수체 내부에 다시 돌아오고 나머지는 투과하여 E_{t2} 로서 흡수체 정면으로 나와서 전파흡수체를 통하여 반사파가 된다.

2회째 내부로 들어 온 파 E_{t2} 는 앞서 설명한 것과 동일한 과정을 몇 번이나 거치며... E_{t3} 은 반사파로 정면으로 내보내게 된다. 그러나 흡수체 내부를 왕복할 때마다 감쇠를 받기 때문에 반사의 회수를 더해감에 따라 전계의 크기는 점차 작아진다.

이상의 현상으로부터 전파흡수체의 반사계수 Γ 는 (2.50)에 나타내는 바와 같이 E_{r1} , E_{r2} , E_{r3} , ...의 벡터적인 합 E 을 사용하여 구할 수 있다.

$$\Gamma = \frac{E}{E_0} = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} E_{rn}}{E_0} \quad (2.50)$$

반사계수의 계산에 의하여 몇 번째까지의 전파 왕복을 고려했을 때 충분한지를 흡수체의 감쇠 정수 α 나 흡수체의 두께에 의해 결정된다. 예를 들어 제1근사로서 1회의 왕복에서의 감쇠가 대단히 큰 것으로 하여 2회째 이후의 왕복에 의한 반사의 영향을 무시하고 생각하여 보면 이 경우 흡수체 표면에 있어서 최초의 반사전계 E_{r1} 과 후면 금속판에 의해서 반사되어 돌아온 반사전계 E_{r2} 의 크기가 같고 그 위상을 역상(180° 위상차)으로 하는 것이 가능하면 흡수체의 반사계수가 0이 되고 이 경우 흡수체는 전계 감쇠시킴과 동시에 전계의 위상을 지연시키는 역할을 하게 된다. 그러나 현실적으로 예를 들면 20dB 이상의 큰 흡수량을 가지는 전파흡수체의 경우에는 이 처럼 1회의 왕복만을 고려하는 것만으로는 불충분하며 보다 여러 번의 왕복까지 고려할 필요가 있다.

2.2.2 설계법(무반사)

그림 (2.7)에서처럼 자유공간을 전파하는 평면파가 전파흡수체에 수직 입사하는 경우이고 전파흡수체의 후면에는 반사판으로서의 역할을 하는 금속판이 붙어져 있다. 이 전파흡수체를 분포정수선로로 바꿔 놓으면 그림 (2.8)처럼 된다.

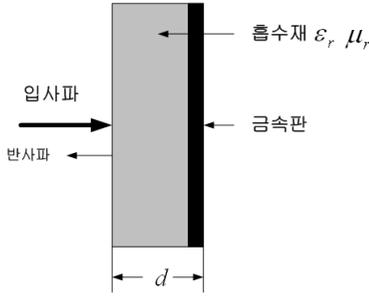


그림 2.7 1층형 전파흡수체의 구성
Fig. 2.7 Structure of one-sheet EM wave absorber.

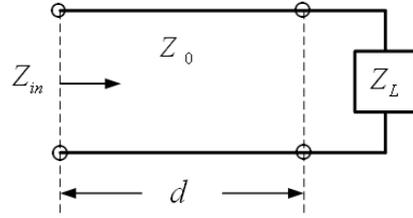


그림 2.8 전기적 등가회로
Fig. 2.8 Electrical equivalent circuit.

그림과 같이 종단에 Z_L 의 부하를 접속한 특성임피던스 Z_C 의 분포정수선로에 있어서, 종단으로부터 거리 d 의 위치에 있는 점으로부터 종단 측을 들어다 본 임피던스 Z_{in} 는 전파정수를 γ_c 라 하면

$$Z_{in} = Z_C \frac{Z_L + Z_C t \gamma_c d}{Z_C + Z_L t \gamma_c d} \quad (2.51)$$

가 된다. 여기에서 전파흡수체의 특성임피던스 Z_C 및 전파정수 γ_c 는 식 (2.32), 식 (2.33)에 나타낸 바와 같이

$$Z_C = Z_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \quad (2.52)$$

$$\gamma_c = j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \quad (2.53)$$

로 나타낼 수 있다.

그림 (2.7)의 해석 모델에서 Z_L 은 금속판의 특성 임피던스가 되므로 $Z_L=0$ 이 된다. 식 (2.52)과 식 (2.53)조건하에서 식 (2.51)에 대입하면 최종적으로 식 (2.51)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$Z_C = Z_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tanh\left(j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\mu_r \epsilon_r}\right) \quad (2.54)$$

일례로서 전파흡수체를 유전재료를 이용해서 제작한다면, $\mu_r=1$ 이기 때문

에 식 (2.54)을 고쳐 쓰면

$$Z_{in} = Z_0 \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \tanh(j \frac{2\pi d}{\lambda} \sqrt{\epsilon_r}) \quad (2.55)$$

이 된다. 흡수체 표면에서의 무반사(즉 반사계수 $\Gamma=0$)가 되는 조건은

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \quad (2.56)$$

에 의하여 $Z_{in} = Z_0$ 이기 때문에, 이 조건 식에 ((2.55)를 대입하면

$$1 = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \tanh(j \frac{2\pi d}{\lambda} \sqrt{\epsilon_r}) \quad (2.57)$$

로 된다. 이것을 무반사 조건식이라 부른다.

수직입사의 경우와 같은 방법으로 TE파, TM파의 사입사에 대한 무반사 조건식도 각각 TE파와 TM파에 대한 파동임피던스와 전파정수를 사용해서 다음 식으로 구할 수 있다.

TE파의 경우

$$1 = \frac{\cos\theta}{\sqrt{\epsilon_r - \sin^2\theta}} \tanh(j \frac{2\pi d}{\lambda} \sqrt{\epsilon_r - \sin^2\theta}) \quad (2.58)$$

TM파의 경우

$$1 = \frac{\sqrt{\epsilon_r - \sin^2\theta}}{\sqrt{\epsilon_r} \cos\theta} \tanh(j \frac{2\pi d}{\lambda} \sqrt{\epsilon_r - \sin^2\theta}) \quad (2.59)$$

이상의 식 (2.57)~식 (2.59)에서 파장 λ 로 규격화한 흡수체의 두께 d/λ 에 대하여 복소수유전율의 실수부 ϵ_r' 과 허수부 ϵ_r'' 의 해를 구하고 이 값을 복소평면($\epsilon_r' - \epsilon_r''$ 평면)상에 나타낸다. 이 곡선은 통상 무반사 곡선이라 한다. 이 곡선을 이용하여 간단한 수직입사나 TE파, TM파에 대한 사입사에 대한 전파흡수체가 설계 가능하다.

2.3 2층형 전파흡수체

그림 (2.9)에 나타내는 표면층과 흡수 층을 가지는 2층형 전파흡수체의 해

석도 전송선이론에 의하여 이루어질 수 있다. 즉 부하로부터 d거리에서의 입력 임피던스 Z_{in} 는 다음 식으로 표시할 수 있다.

$$Z_{in}(d) = Z_C \frac{Z_L + Z_C \tanh \gamma_C d}{Z_C + Z_L \tanh \gamma_C d} \quad (2.60)$$

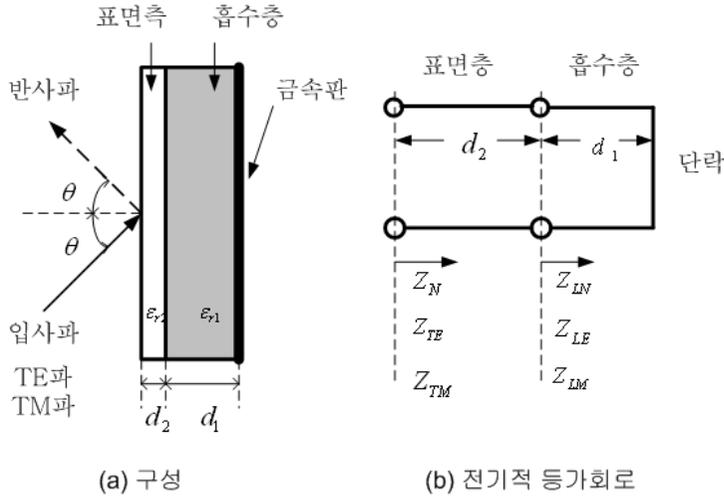


그림 2.9 2층형 전파흡수체의 구성

Fig. 2.9 Structure of two-sheet EM wave absorber: (a) structure, (b) electrical equivalent circuit.

금속판으로 단락된 1층 구성의 전파흡수체의 경우에 부하 임피던스 Z_L 는 0(zero)지만 2층의 전파흡수체의 경우에는 먼저 최초에 흡수 층 전면으로부터 금속판의 방향을 들어다 본 입력 임피던스를 계산하고 이것을 부하 임피던스 Z_L 로 위식에 대입하면 표면층 전면으로부터 금속판 방향을 들어다 본 입력 임피던스를 계산할 수 있다. 이하, 같은 방법으로 계산할 수 있는 표면층 전면에서 들어다 본 입력 임피던스를 써서 수직 입사 및 사입사의 경우로 나누어 반사계수를 유도해 본다.

1. 수직입사의 경우

흡수 층 전면으로부터 들어다 본 수직입사시의 입력임피던스 Z_{LN} 은

$$Z_{LN} = \frac{Z_0}{\sqrt{\varepsilon_{r1}}} \tanh(j2\pi \sqrt{\varepsilon_{r1}} \frac{d_1}{\lambda}) \quad (2.61)$$

로 된다. 표면층의 특성 임피던스 Z_C 는

$$Z_C = \frac{Z_0}{\sqrt{\varepsilon_{r1}}} \quad (2.62)$$

이 되므로 이들을 식 (2.60)에 대입한 후,

또 $X = \tanh(j2\pi \sqrt{\varepsilon_{r1}} \frac{d_1}{\lambda})$, $Y = \tanh(j2\pi \sqrt{\varepsilon_{r2}} \frac{d_2}{\lambda})$ 라 정의하면 2층 형 전파흡수체에 대한 수직입사시의 입력 임피던스 Z_N 은 다음 식과 같이 구해진다.

$$Z_N = \frac{Z_0}{\sqrt{\varepsilon_{r2}}} \frac{\sqrt{\varepsilon_{r2}} X + \sqrt{\varepsilon_{r1}} Y}{\sqrt{\varepsilon_{r1}} + \sqrt{\varepsilon_{r2}} XY} \quad (2.63)$$

이 입력임피던스를 이용하여 수직입사에 대한 반사계수 Γ_N 은 1층의 경우와 마찬가지로 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\Gamma_N = \frac{Z_N - Z_0}{Z_N + Z_0} \quad (2.64)$$

2. TE파의 경우

TE파가 입사각도 θ 로 입사하는 경우, 흡수층 전면으로부터 들어다 본 입력임피던스 Z_{LE} 는

$$Z_{LE} = \frac{Z_0}{\sqrt{\varepsilon_{r1} - \sin^2\theta}} \tanh(j2\pi \sqrt{\varepsilon_{r1} - \sin^2\theta} \frac{d_1}{\lambda}) \quad (2.65)$$

이고 표면층의 특성 임피던스 Z_C 는

$$Z_C = \frac{Z_0}{\sqrt{\varepsilon_{r2} - \sin^2\theta}} \quad (2.66)$$

이다. 이들을 식 (2.60)에 대입한 후,

또 $X = \tanh(j2\pi \sqrt{\varepsilon_{r1} - \sin^2\theta} \frac{d_1}{\lambda})$, $Y = \tanh(j2\pi \sqrt{\varepsilon_{r2} - \sin^2\theta} \frac{d_2}{\lambda})$ 라 정의하면 2층 형 전파흡수체에 대한 수직입사시의 입력 임피던스 Z_{TE} 은 다음 식과 같이 구해진다.

$$Z_{TE} = \frac{Z_0}{\sqrt{\varepsilon_{r2} - \sin^2\theta}} \frac{X/\sqrt{\varepsilon_{r1} - \sin^2\theta} + Y/\sqrt{\varepsilon_{r2} - \sin^2\theta}}{1/\sqrt{\varepsilon_{r2} - \sin^2\theta} + XY/\sqrt{\varepsilon_{r1} - \sin^2\theta}} \quad (2.67)$$

그리고 반사계수 Γ_{TE} 는 Z_{TE} 를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Gamma_{TE} = \frac{Z_{TE} - Z_0/\cos\theta}{Z_{TE} + Z_0/\cos\theta} \quad (2.68)$$

3. TM파의 경우

TE파가 θ 로 입사하는 경우에도 마찬가지로 먼저 흡수층 전면으로부터 본 입력 임피던스 Z_{LM} 는

$$Z_{LM} = \frac{Z_0 \sqrt{\varepsilon_{r1} - \sin^2\theta}}{\varepsilon_{r1}} \tanh(j2\pi \sqrt{\varepsilon_{r1} - \sin^2\theta} \frac{d_1}{\lambda}) \quad (2.69)$$

이고 표면층의 특성 임피던스 Z_C 는

$$Z_C = \frac{Z_0}{\sqrt{\varepsilon_{r2} - \sin^2\theta}} \quad (2.70)$$

이다. 이들을 식 (2.60)에 대입한 후,

또 $X = \tanh(j2\pi \sqrt{\varepsilon_{r1} - \sin^2\theta} \frac{d_1}{\lambda})$, $Y = \tanh(j2\pi \sqrt{\varepsilon_{r2} - \sin^2\theta} \frac{d_2}{\lambda})$ 라 정의하면 2층형 전파흡수체에 대한 수직입사시의 입력 임피던스 Z_{TM} 은 다음 식과 같이 구해진다.

$$Z_{TM} = \frac{Z_0 \sqrt{\varepsilon_{r2} - \sin^2\theta}}{\varepsilon_{r2}} \frac{X\sqrt{\varepsilon_{r1} - \sin^2\theta}/\varepsilon_{r1} + Y\sqrt{\varepsilon_{r2} - \sin^2\theta}/\varepsilon_{r2}}{\sqrt{\varepsilon_{r2} - \sin^2\theta}/\varepsilon_{r2} + XY\sqrt{\varepsilon_{r1} - \sin^2\theta}/\varepsilon_{r1}} \quad (2.71)$$

그리고 반사계수 Γ_{TM} 는 Z_{TM} 을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Gamma_{TM} = \frac{Z_{TM} - Z_0/\cos\theta}{Z_{TM} + Z_0/\cos\theta} \quad (2.72)$$

이상의 2층 구성의 전파흡수체에 관해서 기술한 바와 같이 수직 입사나 사입사에 대하여 표면에서 들어다 본 입력 임피던스 Z_N , Z_{TE} 및 Z_{TM} 는 여러 가지의 변수에 따라 변화한다. 따라서 설계할 시에 있어서는 어떤 변수에 착안하는가에 따라 각종 특성을 가지는 전파흡수체를 설계할 수 있다. 그림 (2.10)은 그 특성의 개요를 보여주는 것으로 (a) 주파수, (b) 입사각도, (c) 편파에 착

안한 경우로 대별된다. 즉 주파수에 착안한 경우에는 광대역특성, 입사각도에 착안한 경우에는 광각도 특성, 편파에 착안한 경우에는 양편파 특성이 뛰어난 전파흡수체가 실현될 수 있게 된다. 그림 2.10은 2층 형 전파흡수체의 설계 그래프다.

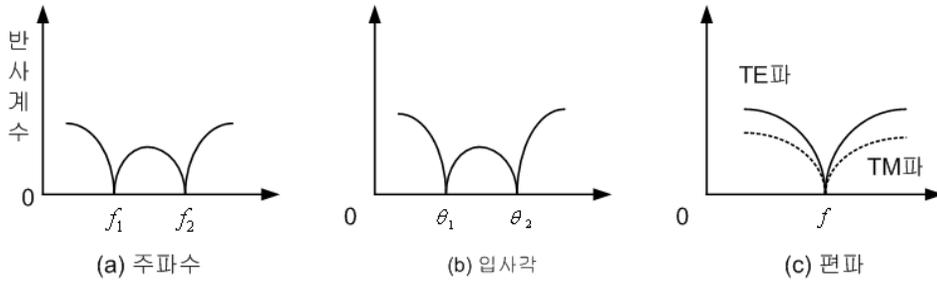


그림 2.10 2층형 전파흡수체의 설계

Fig. 2.10 Design of two-sheet EM wave absorber: (a) frequency characteristics, (b) incident angle (c) partial polarization.

제 3 장 도전성 섬유의 특성

3.1 도전성 섬유

도전성 섬유란 간단히 도전 성능을 지니고 있는 섬유를 말한다. 여기서 말하는 섬유는 직경이 100 μ m 이하, 본 연구에서는 직경이 30 μ m 이하의 극세 섬유이다.

도전성 섬유를 제조하는 데에 따라서 크게 블렌딩, 코팅, 복합사로 나눌 수 있다. 블렌딩하는 방법은 금속선을 반복 Dies에 통과하여 가늘게 하거나 탄소나 활성탄을 고루 분포시켜서 도전성을 갖게 하는 것으로 아크릴, 카이놀계 비닐론 섬유에 사용하는 방법이다. 코팅형은 말 그대로 비전도성 물질의 표면에 도전성 물질을 입히는 것으로 도전성능이 우수하게 나오는 것으로 알려져 있다. 복합형은 일반적으로 도전성 카본 블랙을 분해시킨 도전성 물질이나 한개 이상의 도전체를 함유한 섬유이다. 표 3.1은 도전성 섬유의 분류이다.

표 3.1 도전성 섬유의 분류

Table 3.1 Classification of conductive fiber.

Type	도전성 섬유
블렌딩형	금속섬유, 탄소, 활성탄 섬유
코팅형	금속피복, 도전성수지, 금속 화합물 표층 함유 섬유
복합형	도전체 함유

본 연구에서는 현재 전자기차폐에서 많이 사용하고 중점적으로 연구되고 있는 플라스틱섬유에 금속을 코팅한 도전성 섬유를 이용하여 실험 연구를 진행하려 한다.

플라스틱 하우징에 전도성을 부여하는 방법은 여러 가지가 있지만 차폐효과와 경제성이 최대의 변수로 떠오르면서 (1)플라스틱 표면에 정밀한 도금 막을 형성시키는 무전해 도금과 (2)전도성 재료를 플라스틱과 혼합하여 사출 성형하는 것이 주종을 이루고 있다. 무전해 도금기술은 수려한 외관과 우수한 전자파

차폐특성을 가지고 있어 노트북 PC, 휴대폰 등 휴대형 단말기에 채용되고 있다 [8] [14]. 그러나 이 방법은 수십 개의 공정을 거쳐야 하기 때문에 가격이 여타 방법에 비하여 월등히 비싸고, 외부 충격에 약하며 공정에서 환경문제를 유발하는 단점이 있다. 전도성 재료를 플라스틱과 혼합하여 사출 성형하는 전도성 플라스틱은 무전해 도금에 비하여 차폐성능이 떨어지지만 가격이 저렴하고 충격에 강하기 때문에 일본, EC 및 미국의 수많은 플라스틱 제조회사에서 연구 개발되어 제품화 되고 있다[8] [14].

3.2 도전성 섬유의 전자파흡수원리

3.2.1 전자파차폐 성능

전자파차폐 성능은 차폐효율(Shielding efficiency, SE)로 나타낼 수 있으며 다음의 식(1)로 정의되며 전자파가 재료를 통과할 때 감쇄되는 상대적 크기인 decibel(dB)로 나타낸다.

$$SE=10\log\frac{P_I}{P_r}=20\log\frac{E_I}{E_R} \quad (3.1)$$

여기서, P_I 와 P_r 는 각각 입사와 투과되는 전자파의 power이고 E_I 와 E_r 는 입사와 투과되는 전기장의 세기이다. 만약 차폐효율이 10dB일 경우에는 입사된 전자파 power의 10%에 해당하는 전자파가 투과된 경우로 전자파차폐가 매우 미미한 수준인 반면에 100dB일 경우에는 입사전자파의 power가 $1/10^{10}$ 으로 감소되어 투과되는 경우로 매우 우수한 차폐성능을 보인다 할 수 있다.

전자파차폐 효율을 이론적으로 계산 또는 측정할 때 전자파 발생원으로부터 차폐 재료까지의 거리에 따라 전자파차폐를 두 영역으로 구분할 수 있다. 전자파발생원으로부터 차폐 재료까지의 거리(d)와 전자파의 파장(λ)의 비인 d/λ 가 $1/2\pi$ 보다 큰 경우에는 far-field shielding이라고 정의하고 반대로 d/λ 가 $1/2\pi$ 보다 작은 경우에는 near-field shielding이라고 정의한다. far-field 영역의 경우 전자파차폐는 평면파(plane wave) 이론을 기초로 하여 해석된다. 반면에 near-field 영역의 경우 전기 쌍극자(electric dipole)와 자기 쌍극자(magnetic dipole)의 기여를 구별하여야 하며 noise source의 외적 형태 등이 고려되어야

한다. near-field 영역에서의 전자파차폐의 경우 다음의 그림 3.1에서 보이는 바와 같이 전기쌍극자에 의한 전기장 차폐효율과 자기 쌍극자에 의한 자기장 차폐효율은 서로 반대되는 서로 상반되는 결과를 보여준다. 즉 주파수가 감소함에 따라 전기장 차폐효율은 증가하고 자기장 차폐효율은 감소하는 것을 알 수 있다. 주파수가 감소할수록 자기장 차폐효율이 감소되는 것은 높은 투자율을 가진 물질로 구성된 차폐 재료로 그 감소율을 둔화시키는 것이 최선의 방법이다[9].

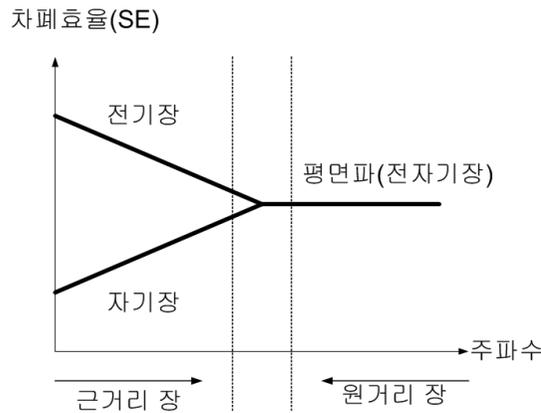


그림 3.1 far-field 영역과 near-field 영역에서의 차폐 특성 비교

Fig. 3.1 Comparison between shielding effects of far-field and near-field regions.

전기장에 대해서는 전자파원과 차폐재의 거리에 따라 아래 관계가 성립된다 [10].

$$Z_{W} = 1/j\omega\epsilon_0 r \quad (3.2)$$

$$Z_{W} = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0} \approx 377 \quad (3.3)$$

ω : 각주파수 (= $2\pi f$, f : 주파수)

r : 미소 dipole에서의 거리

ϵ_0 : 공간의 유전율(=8.855×10⁻¹²)

μ_0 : 공간의 투자율(=1.257×10⁻⁶)

한편 자기장에 대해서는 임피던스와 거리의 관계가 아래와 같다.

$$Z_W = j\omega\epsilon_0 r \quad (3.4)$$

$$Z_W = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0} \approx 377 \quad (3.5)$$

Near field condition에서 파원과 차폐재의 거리가 증가하여 파동 임피던스 (wave impedance, E/H)가 377Ω에 이르면 far field condition으로 전이된다.

3.2.2 전파흡수에 관한 분석

여기서는 일상생활에서 주로 문제가 되는 far-field shielding에 대하여만 서술한다. far-field 영역에서의 전자파는 다음의 그림 3.2에 보이는 바와 같이 차폐물질에 입사할 때 일부는 재료의 표면에서 반사(SE_R)되고, 일부분은 흡수(SE_A)되고, 또는 물질내부에서 다중반사(SE_{MR})에 의하여 감쇄가 되고 나머지가 투과된다.

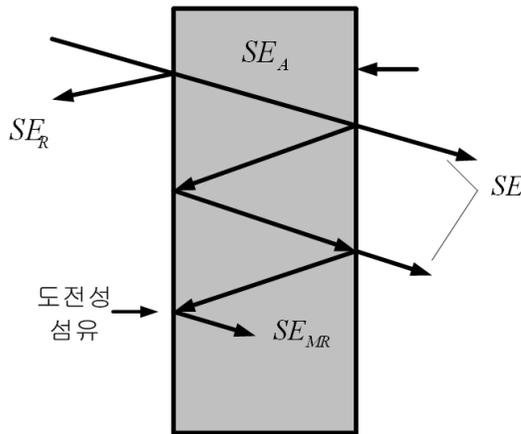


그림 3.2 전자파의 반사, 흡수, 다중반사 및 투과

Fig. 3.2 EM wave reflection, absorption, multi-reflection and transmission.

따라서 SE는 다음의 식으로 표시 할 수 있다.

$$SE = SE_R + SE_A + SE_{MR} \quad (3.6)$$

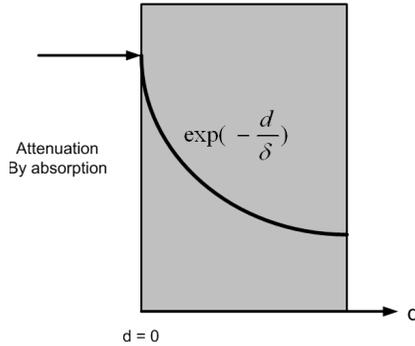


그림 3.3 차폐재료 내에서의 전자파 감쇄

Fig. 3.3 EM wave attenuation characteristic in shielding materials.

입사된 전자파는 그림 3.3에 나타난 바와 같이 재료내부에서 지수 함수적으로 즉 $\exp(-d/\delta)$ 함수를 따라 감쇄가 일어난다. 여기에서 δ 는 skin depth이다. skin depth란 전자파가 재료를 통해 진행할 수 있는 깊이를 나타내는 척도로 입사된 전자파의 세기에 비해 전자파의 세기가 $1/e$ 로 감쇄될 때까지 전자파가 재료 내부로 진행한 길이로 정의된다. skin depth는 입사파의 주파수 및 매질의 전기전도도와 다음의 식(3.7)과 같은 관계를 가져 일반적으로 전기전도도가 높을수록 그리고 전자파의 주파수가 높을수록 skin depth는 작아진다.

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu_0 \omega \sigma}} \quad (3.7)$$

여기서 μ_0 는 free space의 permeability, ω 는 전자파의 주파수, 그리고 σ 는 매질의 전기전도도이다. 따라서 일반적으로 전자파 차폐용 재료로 많이 사용되고 있는 금속재료는 반사율이 높은 대신에 전자파가 흡수되는 skin depth가 작아 전자파의 반사에 의한 차폐를 이용한 차폐 재료이다.

전자파가 금속을 만나면 반사되는 현상을 스넬의 법칙(Snell's law)으로 설명할 수 있는데, 전자파는 금속 표면에서 입사각과 같은 각도로 완전반사(total reflection)를 한다. 이 성질을 이용하여 금속을 통해 전자파를 차폐하거나 반사판 역할을 하여 전자파를 특정된 방향으로 보내는 것이 가능하다. 금속에 의한 전자파 반사의 원리는 정확히 표현하면 반사라기보다는 재생산의 의미

로 볼 수 있다. 다음의 그림 3.4에 나타낸바와 같이 진행 중인 전자파가 전기
 가 잘 통하는 금속에 닿으면서 거의 모든 에너지가 순간적으로 금속 표면의 전
 류로 변화된다. 이로 인해 갑작스럽게 발생된 순간 표면전류는 입사각과 같은
 각도의 전자기파를 생성하는데 이 과정에서 금속의 전도도에 따라 약간의 손실
 이 발생한다.

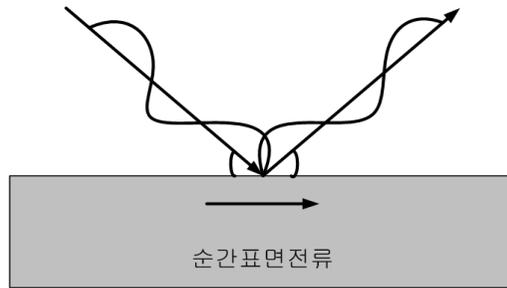


그림 3.4 금속에 의한 전자파반사 기구

Fig. 3.4 Metal of EM wave reflection mechanism.

한편 위의 식(2)의 각항들을 구체적으로 다음의 식(3.8), (3.9), (3.10)과
 같이 나타낼 수 있다.

$$SE_A = 8.686(2\pi/\lambda)[(\epsilon_r/2)\{(1 + \tan\delta)^{1/2} \mp 1\}]^{1/2}d \quad (3.8)$$

$$SE_R = 20\log |1+n|^2/4|n| \quad (3.9)$$

$$SE_{MR} = 20\log |1 - \exp(-2rd)(1-n)^2/(1+n)^2| \quad (3.10)$$

여기서 $(2\pi/\lambda)[(\epsilon_r/2)\{(1 + \tan\delta)^{1/2} \mp 1\}]^{1/2}$ 을 α (흡수계수)라 하고 ϵ_r 는
 유전상수의 실수부이며 부호는 각각 양과 음의 유전상수의 경우에 적용된다.
 loss tangent($\tan \delta$)는 $\sigma/(\omega \epsilon_0 \epsilon_r)$ 로 정의되고 n 은 복소수 형태의 굴절률
 이며 $\gamma = \alpha(1+i)$ 이다. α , n 그리고 γ 는 시료의 전기전도도와 유전상수 그리
 고 자기투과율(magnetic permeability)과 직접 관련이 있는 물리적 상수들이
 다. 따라서 주파수에 따른 전기전도도와 유전상수의 측정이 전자파차폐와 관련
 된 연구와 필수적이다.

위의 식(3.8)에서 알 수 있듯이 흡수에 의한 전자기파의 차폐에서는 시료의

두께가 증가함에 따라 차폐효율도 증가한다. 일반적으로 전기전도도가 낮은 차폐 재료의 경우에는 skin depth가 길어져서 흡수에 의한 전자파의 차폐가 효율적으로 사용될 수 있다. 반면에 반사에 의한 전자파의 차폐효율은 식(3.9)에 나타난 바와 같이 시료 자체의 고유한 성질에 의해 결정되며 시료의 전기전도도와 유전상수가 클수록 증가한다. 다중반사에 의한 기여는 시료의 두께가 skin depth보다 적은 경우 부분적으로 수정되는 항이다.

또한 far-field shielding의 경우에 재료의 전기전도도가 비교적 낮을 때(10 s/cm 이하)에는 재료의 두께와 skin depth의 상대적 크기에 따라 차폐효율은 다음의 식 (3.11), (3.12)과 같은 2개의 다른 식에 의하여 나타낼 수 있다.

만약 재료의 두께가 skin depth보다 훨씬 작을 ($d \ll \delta$, electrically thin) 경우에는 다음의 식과 같이 전자파효율은 입사전자파의 주파수에 관계없이 재료의 전기전도도(또는 표면비저항)에만 의존하게 된다.

$$SE = 20 \log \left(1 + \frac{1}{2} Z_0 \sigma d \right) = 20 \log \left(1 + \frac{Z_0}{2R_s} \right) \quad (3.11)$$

여기서 Z_0 는 free space의 impedance(337Ω)이고 R_s 는 매질의 specific surface resistivity($1/\sigma d$)이다. 반대로 만약 재료의 두께가 skin depth보다 훨씬 큰 ($d \gg \delta$, electrically thick) 경우에는 다음의 식 (3.12)과 같이 두 항으로 된 식으로 설명된다.

$$SE = 10 \log \left(\frac{\sigma}{16\omega\epsilon_0} \right) + 20 \frac{d}{\delta} \log e \quad (3.12)$$

여기서 ϵ_0 는 free space의 permittivity(介電常數)이다.

우변의 첫 번째 항은 반사에 의한 차폐를 나타내는 항이고 두 번째 항은 전자파가 도전성유재료를 경과하면서 흡수에 의한 감쇄되는 차폐를 나타내는 항이다. 식(3.12)에서 알 수 있듯이 고주파 전자파인 경우에 두 번째 항이 첫 번째 항보다 월등히 커져 재료의 두께가 두꺼울수록 둘째 항이 커져 흡수에 의한 차폐가 증가하는 것을 알 수 있다.

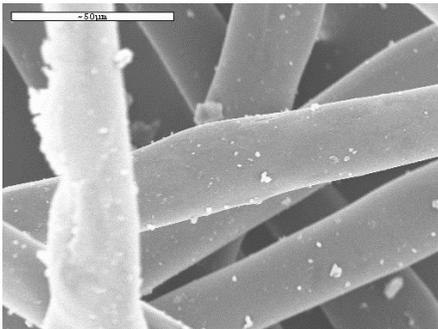
제 4 장 도전성 섬유를 이용한 전파흡수체의 재료 및 제작

4.1 도전성 섬유시트 및 전파흡수재료

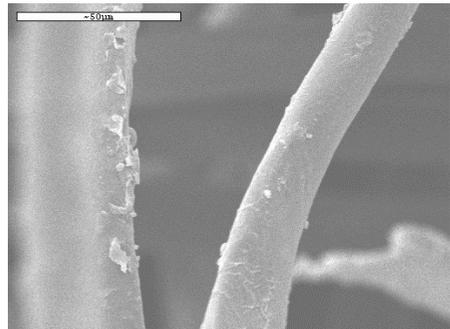
4.1.1 알루미늄 도금 섬유시트의 물리적 특성



(a) 알루미늄 도금 섬유



(b) 도금하지 않은 섬유



(c) 도금한 섬유

그림 4.1 알루미늄 도금 섬유시트의 사진과 전자현미경에서 본 사진

Fig. 4.1 Photograph of the alumina plated fiber sheet and the photos made from electro-microscope: (a) fiber with alumina-plated, (b) fiber without alumina plated, (c) fiber with gold-plated.

표 4.1 알루미늄 도금 섬유시트의 물리적 성질

Table 4.1 Physical property of the alumina-plated fiber sheet.

코팅	알루미늄 코팅
색상	은백색(실버)
두께	자연 상태에서 1.5mm, 압축 상태 0.25mm(보통 손 힘)
섬유 직경	약 25 μ m
표면비 저항	약 60 Ω /cm ²

표 4.1에서 알루미늄 도금 섬유시트의 일부분 물리적 성질을 알 수 있다. 알루미늄 도금섬유는 도전손실이 생길 수 있는 일정한 표면비저항이 있다. 그림 4.1 (a)는 알루미늄도금 섬유의 실제 사진이고 (b)는 도금하지 않았을 때의 전자현미경 사진이며 (c)는 도금 한 후의 전자현미경 확대 사진이다.

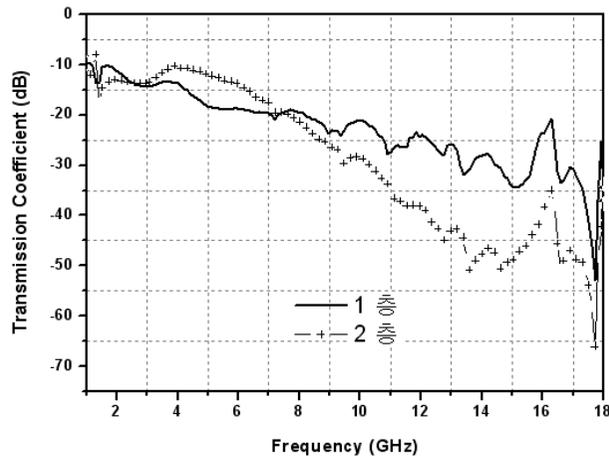


그림 4.2 알루미늄 도금 섬유의 전자파차폐효율

Fig. 4.2 EM wave shielding effect of the alumina plated fiber.

그림 4.2 알루미늄 도금 섬유의 전자파차폐효율을 나타낸 그래프에서 관찰할 수 있는바 GHz주파수에서 전자파 차폐효율은 최소 10dB이상으로 1~18GHz범위에서 평균 약 20dB 이상으로 나타난다. 다음 섬유를 두 층으로 하면 전자파 차폐효율이 더 우수한 것으로 나타난다. 그림 4.3은 알루미늄 도금섬유를 1층부터 8층까지 차례로 할 때의 전파흡수능 변화 그래프인데 두께가 두꺼울수록(층수가 증가 할수록) 더욱 우수한 전파흡수능을 나타내고 공진 중심 주파수는 저주파 쪽으로 이동한다. 단층일 때는 거의 전파를 흡수하지 않는 것으로 나타

난다.

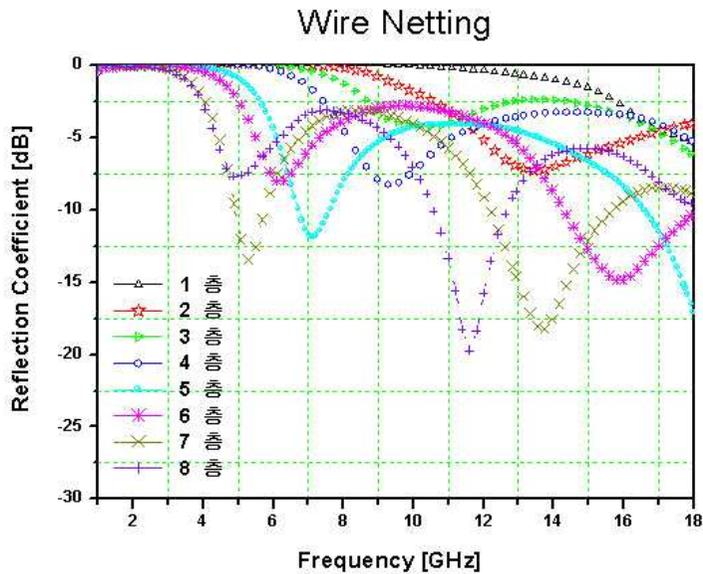


그림 4.3 알루미늄 도금 섬유 1층부터 8층까지 전파흡수능을 나타낸 그래프
 Fig. 4.3 EM wave absorption ability for various sheets.

4.1.2 금 도금 섬유시트의 물리적 특성

표 4.2 금 도금 섬유시트의 물리적 성질

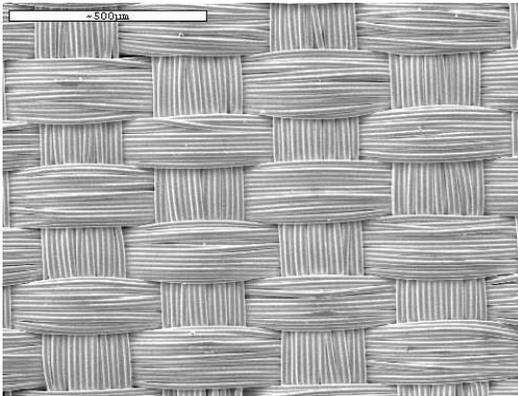
Table 4.2 Physical property of the gold-plated fiber sheet.

코	팅	금 코팅
색	상	황금색
두	께	0.09 mm
섬유 직경		약 15~20 μ m.
표면비저항		약 0.1 Ω /cm ²

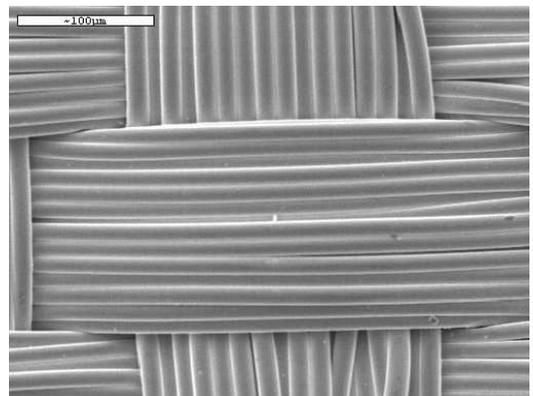
표 4.2에서 금 도금 섬유시트의 일부분 물리적 성질을 알 수 있다. 여기서 볼 수 있는바 표면비저항이 매우 작는데 이는 전도 손실이 매우 작다는 것을 의미한다. 그림 4.4 (a)는 금도금 섬유의 실제 사진이고 (b)는 100배 확대하였을 때의 전자현미경 사진이며 (c)는 350배 확대하였을 때의 전자현미경 확대 사진이다.



(a) 금 도금 섬유



(b) 100배 확대할 때 금 도금섬유



(c) 350배 확대할 때 금 도금섬유

그림 4.4 금 도금 섬유시트의 사진과 전자현미경에서 본 사진

Fig. 4.4 Photograph of the gold plated fiber sheet and the photos made from electro-microscope: (a) with gold-plating, (b) scale with 1: 100, (c) scale with 1:350.

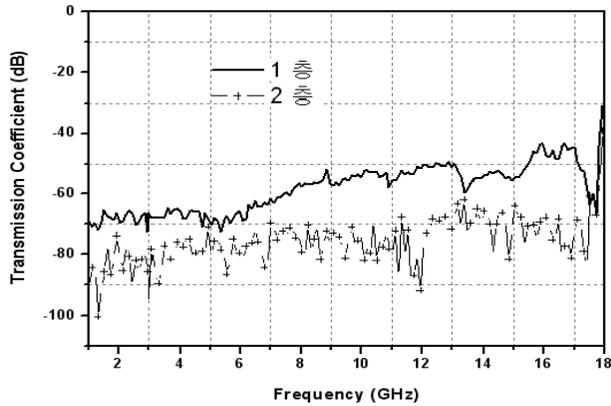


그림 4.5 금 도금 섬유에 의한 전자파 차폐효율

Fig. 4.5 EM wave shielding effects of gold plated fiber.

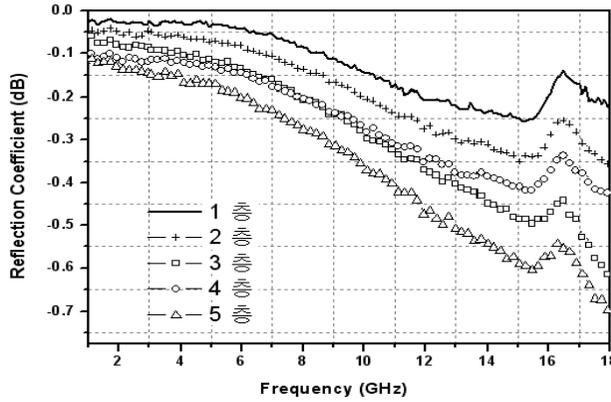


그림 4.6 금 도금 섬유에 의한 전자파 흡수능을 나타낸 그래프

Fig. 4.6 EM wave absorption ability of gold plated fiber.

그림 4.5 금 도금 섬유의 전자파차폐효율을 나타낸 그래프에서 관찰할 수 있는바 GHz주파수에서 전자파 차폐효율은 최소 40dB이상으로 1~18GHz범위에서 평균 약 45dB 이상으로 나타난다. 다음 섬유를 두 층으로 하면 전자파 차폐효율이 더 우수한 것으로 나타난다. 그림 4.6은 금 도금섬유를 1층부터 5층 까지 차례로 할 때의 전자파흡수능 변화 그래프인데 전반 전자파흡수능은 1dB도 되지 않는다. 다시 말하면 금도금 섬유시트는 거의 전파를 흡수하지 않는 것으로 나타난다.

4.1.3 표면비 저항 측정

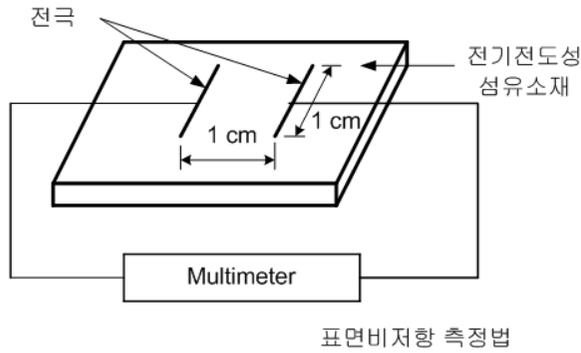


그림 4.7 도전성 섬유의 표면비저항 측정법

Fig. 4.7 Skin resistance measurement method for gold plated fiber.

그림 4.7과 같이 전기전도성 섬유재료의 표면비 저항(ohm/sqaure)은 2단자법에 의하여 측정한다.

4.1.4 전기전도도 측정

그림 4.8과 같이 전기전도성 섬유재료의 전기전도도(S/cm)는 4단자법에 의하여 측정한다.

$$\sigma = \frac{2fln2}{\pi t(R_{12,34} + R_{23,41})} \quad (4.1)$$

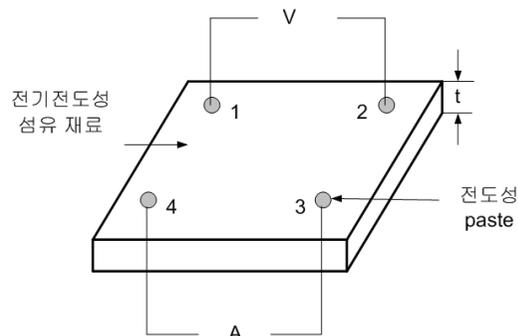


그림 4.8 전기전도도 측정방법

Fig. 4.8 Measurement method for electrical conductivity.

4.1.5 4단자법에 따른 면저항치의 측정

그림 4.9는 4단자법에 의한 면저항치의 저항을 측정법의 개략도이다. 4단자법은 시료가 전극의 간격에 대하여 충분히 클 때에 시료표면에 4개의 단자를 붙이고 외측의 2단자간에 전류 I 를 흘리고, 내측의 2단자간의 전위차(부유 포텐셜) V 를 측정함으로써, 시료의 저항율을 구하는 측정법이다. 지금, 각 단자의 간격을 S_1, S_2, S_3 로 하면, 시료의 저항율 ρ [Ωm]는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho = \frac{V}{I} \left\{ \frac{2\pi}{1/S_1 + 1/S_2 - 1/(S_2 + S_3) - 1/(S_1 + S_2)} \right\} \quad (4.2)$$

더욱이, 단자 간격을 전부 같게 $L = S_1 = S_2 = S_3$ 로 하면 윗 식은 간단히 되어

$$\rho = 2\pi L \frac{V}{I} \quad (4.3)$$

로 된다. 또 이들의 식으로 구한 ρ 를 면저항치의 정의에 따라 다음의 식에 대입함으로써, 면적이 $S = a \times b$ [m^2]의 시료에 대한 면저항치 R [Ω/m^2] 또는 [Ω/cm^2]를 다음 식으로 구할 수 있다.

$$R = \rho S \quad (4.4)$$

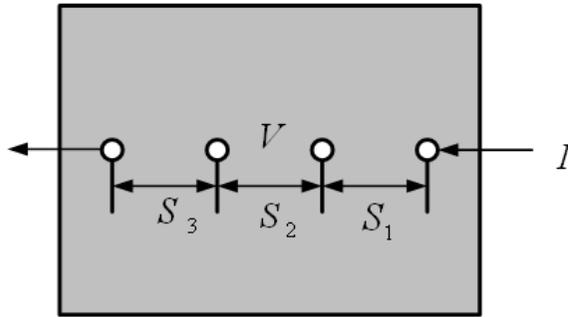


그림 4.9 4단자법에 의한 저항율의 측정

Fig. 4.9 Resistivity measurement using 4-terminal method.

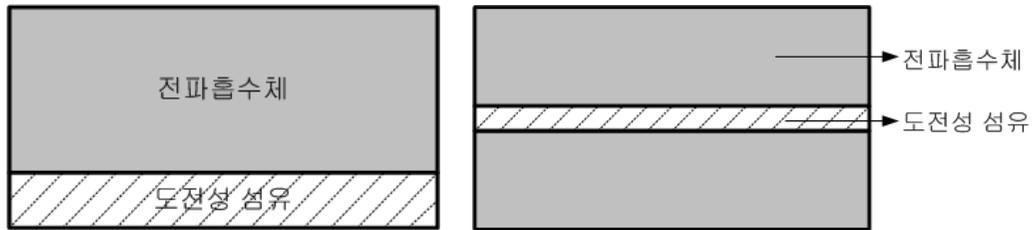
4.1.6 전자파차폐 효율 측정

전자파차폐 효율은 MODEL 360B NET WORK ANALYZER를 이용하여 투과계수 S_{21} 을 측정하는 방법으로 측정한다.

4.2 전파흡수체 제작

4.2.1 제작된 전파흡수체 구조도

아래의 그림은 본 실험에서 제작한 전파흡수체의 구조도이다. 그림 4.10의 (a)에서 처럼 도전 섬유시트를 전파흡수체의 투과면에 부착시켜 제작한다. (b) 그림에서는 도전 섬유시트를 전파흡수체 중간에 넣고 제작한다.



(a) 투과면에 섬유를 부착할시 (b) 전파흡수체 중간에 섬유를 부착할시

그림 4.10 제작 된 전파흡수체 구조도

Fig. 4.10 Fabricated EM wave absorber structure: (a) attaching the fiber upon the bottom of EM wave absorber, (b) embedding the fiber into the middle of EM wave absorber.

4.2.2 전파흡수체와 에폭시 수지의 혼합비율

MnZn페라이트, NiZn페라이트, Ba페라이트, Sendust 를 에폭시 수지와 혼합하여 페인트형 전파흡수체를 만든다.

중량에 따른 혼합 비례는

MnZn페라이트: 에폭시 수지 = 90: 10

NiZn페라이트: 에폭시 수지 = 75: 25

Ba페라이트: 에폭시 수지 = 75: 25

Sendust: 에폭시 수지 = 60: 40

상온에서 건조한 후 두께가 약 0.9mm, 1.7mm, 2.6mm, 3.4mm 전파흡수체를 제조한다.

제 5 장 도전성 섬유를 이용한 전파흡수체의 측정 및 특성 분석

5.1 전파흡수체의 전파흡수능 측정 및 재료정수 측정

5.1.1 전파흡수체의 전파흡수능 측정

아래 그림은 전파흡수능을 측정하는 MODEL 360B NET WORK ANALYZER 설비 사진, 그리고 반사계수 측정 시스템과 샘플 홀더이다.



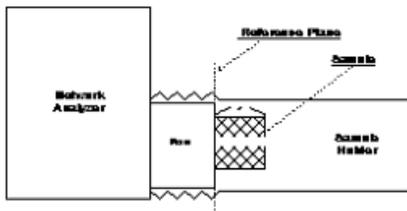
(a) MODEL 360B NET WORK



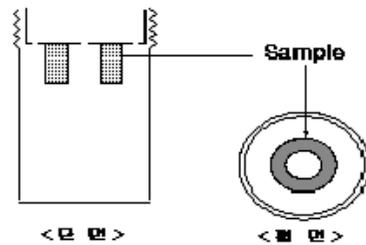
(b) 샘플 홀더

그림 5.1 MODEL 360B NET WORK ANALYZER 설비와 홀더

Fig. 5.1 MODEL 360 Network analyzer and sample holder.



(a) 반사계수 측정 시스템



(b) 샘플 홀더

그림 5.2 반사계수 측정 시스템과 샘플 홀더

Fig. 5.2 Measurement system and sample hold: (a) reflection coefficient measurement system, (b) sample holder.

5.1.2 전파흡수체의 재료정수 측정법

1. 재료정수 계산방법

본 논문에서의 재료정수는 우선 MODEL 360B NET WORK ANALYZER를 이용하여 시편의 반사손실을 측정하였고 측정된 반사손실을 이용하여 다음과 같은 방법으로 계산한다.

우선, Flash Holder를 Sample Holder로 사용하고 그림과 같이 MODEL 360B NET WORK ANALYZER의 Port와 Sample Holder 사이에 틈이 없이 밀착시키면, Reference Plane에서의 반사계수 $S_{11}(l)$ 은 전체의 반사계수 $S_{11}'(l)$ 과 같게 된다.

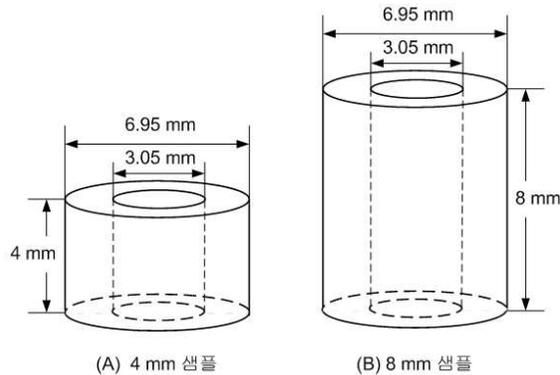


그림 5.3 제작된 샘플 도면

Fig. 5.3 Illustration of the fabricated sample.

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

샘플 길이가 l 일 때의 임피던스는 아래 식과 같다.

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

만약 샘플 길이가 $2l$ 일 때의 반사계수 $S_{11}(2l)$ 은 전체의 반사계수 $S_{11}(l)$ 와 같게 된다. 그러므로 $2l$ 일 때의 임피던스는 다음 식과 같다.

$$Z(2l) = \frac{1 + S_{11}(2l)}{1 - S_{11}(2l)} \quad (5.2)$$

한편 MODEL 360B NET WORK ANALYZER의 폴트와 샘플 홀더는 틸이 없이 밀착되므로

$$Z(l) = Z_C \tanh(rl) \quad (5.3)$$

$$Z(2l) = Z_C \tanh(r2l) \quad (5.4)$$

와 같이 쓸 수 있다. 위의 식에 하이퍼볼릭 탄젠트 공식을 적용하면

$$\tanh(r2l) = \frac{2 \tanh(rl)}{1 + \tanh^2(rl)} \quad (5.5)$$

이 되고 변형하면

$$Z(r2l) = \frac{2 \tanh(rl)}{1 + \tanh^2(rl)} \quad (5.6)$$

$$\tanh(rl) = \sqrt{\frac{2Zl - Z(2l)}{Z'(2l)}} \quad (5.7)$$

이 된다. 위 식으로부터 r , Z_C 을 도출하면

$$r = \frac{1}{l} \tanh^{-1} \sqrt{\frac{2Zl - Z(2l)}{Z'(2l)}} \quad (5.8)$$

$$Z_C = Z'(l) \sqrt{\frac{Z'(2l)}{2Z'(l) - Z'(2l)}} \quad (5.9)$$

이 된다. 위 식을 대입하여 풀면

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

$$\mu_r = -j \frac{C}{2\pi f} \cdot \frac{1}{l^2} \tanh^{-1} \sqrt{\frac{2Z(l) - Z(2l)}{Z(2l)}} \cdot \tanh^{-1} \sqrt{\frac{2Z(l) - Z(2l)}{Z(2l)}} \quad (5.11)$$

그림 5.3은 제작된 샘플 도면인데 A와 B샘플의 길이는 경우에 따라 다르다. 샘플의 내 직경과 외 직경은 모두 같다. 그림 5.4는 샘플 홀더의 상세 구조도이다.

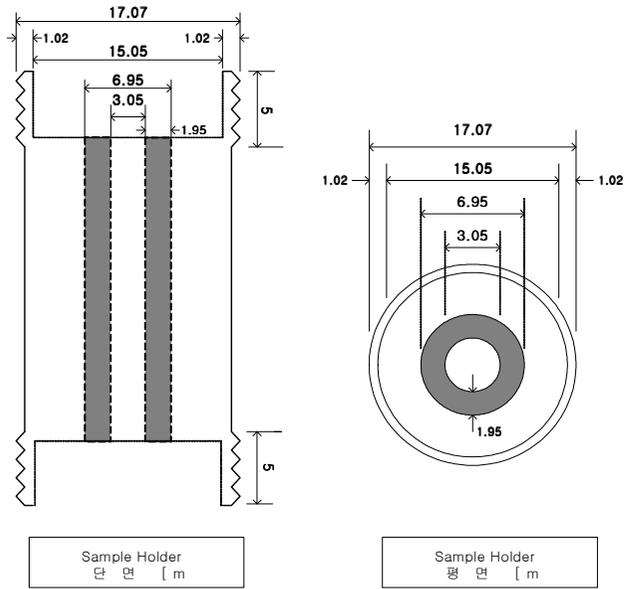


그림 5.4 샘플 홀더의 상세 구조도

Fig. 5.4 Detail illustration of sample holder.

5.2 알루미늄을 도금한 섬유를 투자율과 유전율 변화

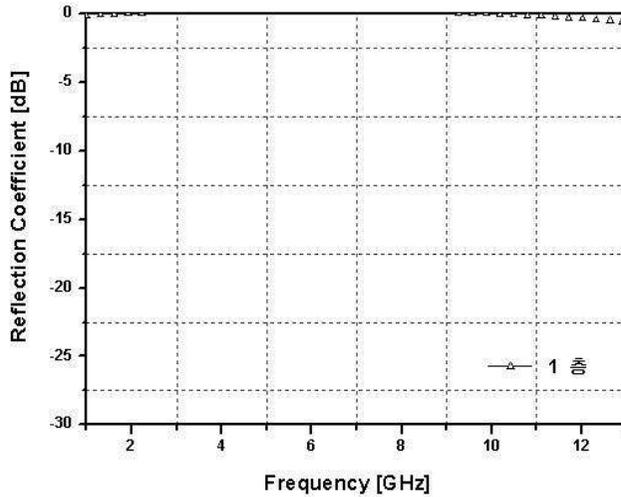


그림 5.5 알루미늄 도금 섬유의 단층 일 때 전파흡수능

Fig. 5.5 EM wave absorption of the one-sheet alumina-plated fiber.

그림 5.5는 두께 d 가 0.25 mm인 금속 도금형 섬유 자체의 전파흡수능을 나타낸 것이고 그림 5.6과 그림 5.7에는 각각 이들의 투자율과 유전율을 나타내었다. 그림 5.5에 나타낸 바와 같이 금속 도금형 섬유의 전파흡수능은 거의 나타나지 않고 있다. 일반적으로 전파흡수능은 투자율과 유전율로 설명되며 투자율의 허수항과 유전율의 허수항이 실수항 보다 큰 주파수 대역에서 전파흡수특성을 나타낸다. 그림 5.6과 5.7을 통해서 알 수 있는 바와 같이 금속 도금형 섬유의 투자율과 유전율의 허수항은 조사된 주파수 범위에서 모두 실수항 보다 작은 값을 보이고 있어 위의 사실(그림 5.5)과 일치함을 알 수 있다.

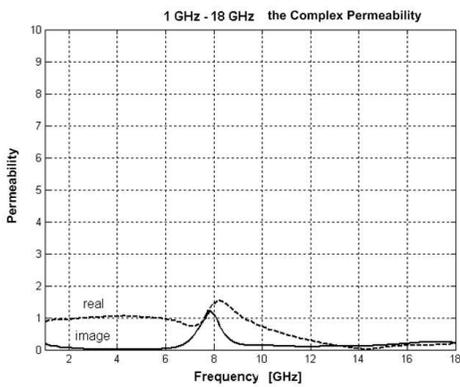


그림 5.6 투자율의 허수부와 실수부 변화 그래프

Fig. 5.6 Frequency-dependent relative permeability.

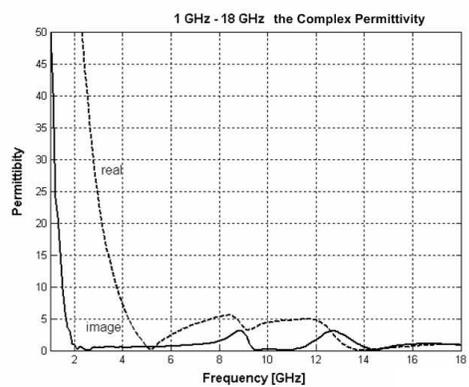


그림 5.7 유전율의 허수부와 실수부 변화 그래프

Fig. 5.7 Frequency-dependent relative permittivity.

5.3 전파흡수체 두께 변화에 따른 전파흡수능 변화

5.3.1 섬유를 첨가하지 않을 때 두께 변화에 따른 전파흡수능 변화

그림 5.8부터 그림 5.11까지는 금속 도금시트를 사용하지 않을 때의 MnZn 페라이트, NiZn페라이트, Ba페라이트, Sendust 전파흡수체의 두께 변화에 따르는 전파흡수능 변화이다.

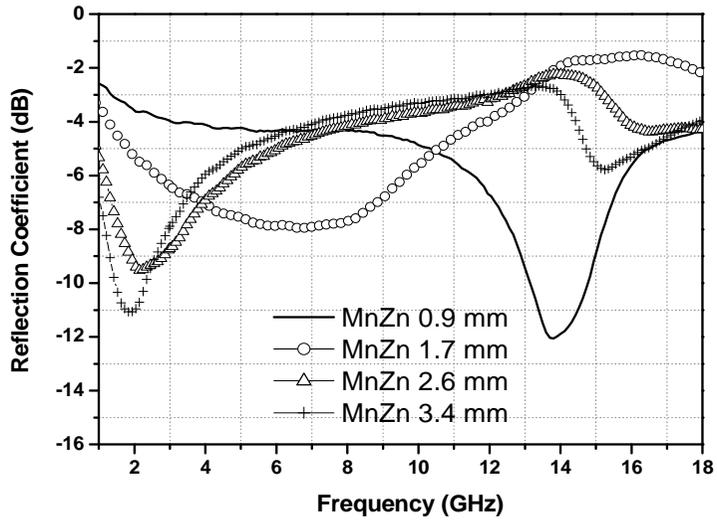


그림 5.8 두께 변화에 따른 MnZn페라이트 전파흡수능 변화
 Fig. 5.8 MnZn ferrite EM wave absorber with different thickness.

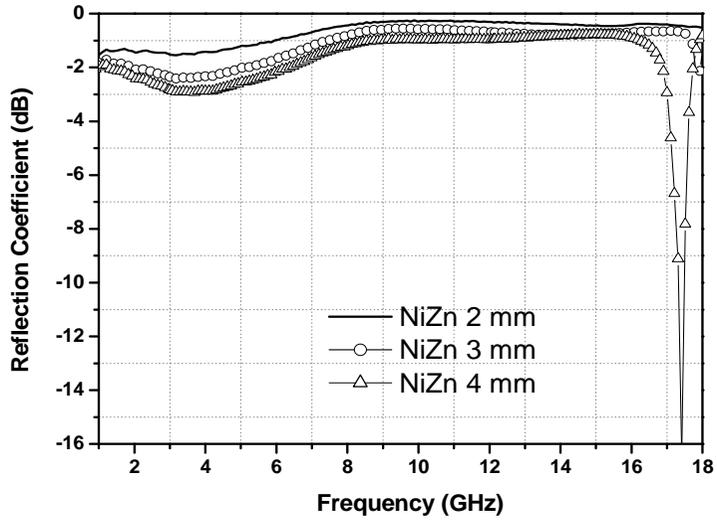


그림 5.9 두께 변화에 따른 NiZn페라이트 전파흡수능 변화
 Fig. 5.9 NiZn ferrite EM wave absorber with different thickness.

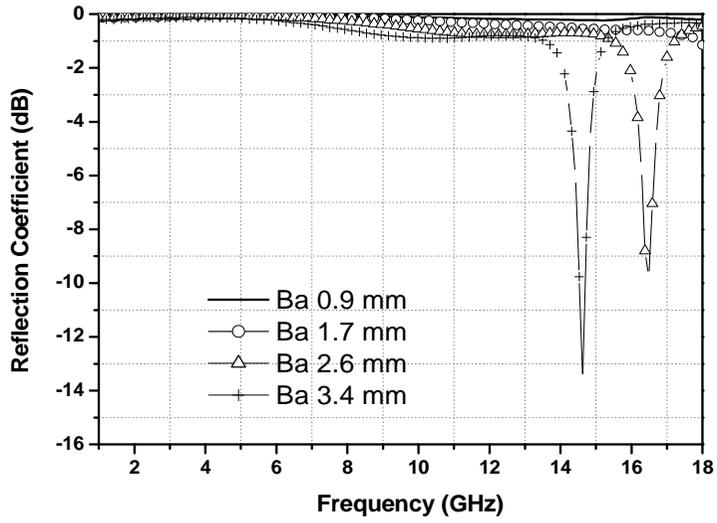


그림 5.10 두께 변화에 따른 Ba페라이트 전파흡수능 변화
 Fig. 5.10 Ba ferrite EM wave absorber with different thickness.

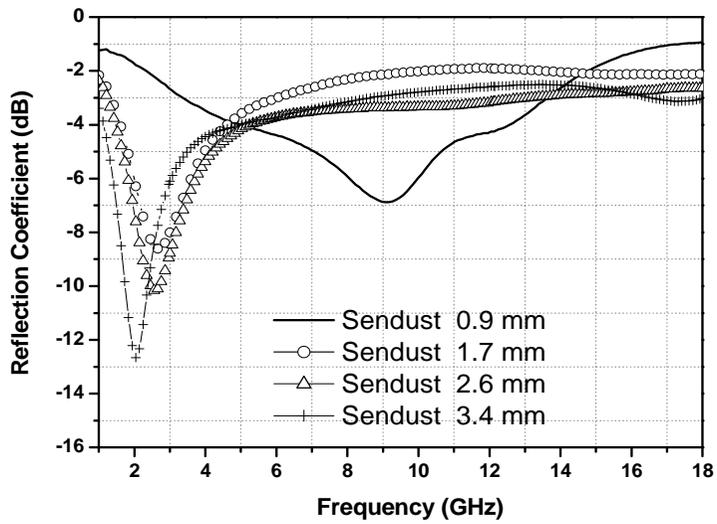


그림 5.11 두께 변화에 따른 Sendust 전파흡수능 변화
 Fig. 5.11 Sendust ferrite EM wave absorber with different thickness.

5.3.2 섬유를 전파흡수체 전자파 투과면에 부착할 때 두께 변화에 따른 흡수능 변화

1. 단층 알루미늄 도전섬유를 전자파투과면에 부착할 시 전파흡수능 변화

그림 5.12부터 그림 5.15까지는 알루미늄 도전섬유를 전자파 투과면에 부착하였을 때의 두께변화에 따르는 전파흡수능 변화이다.

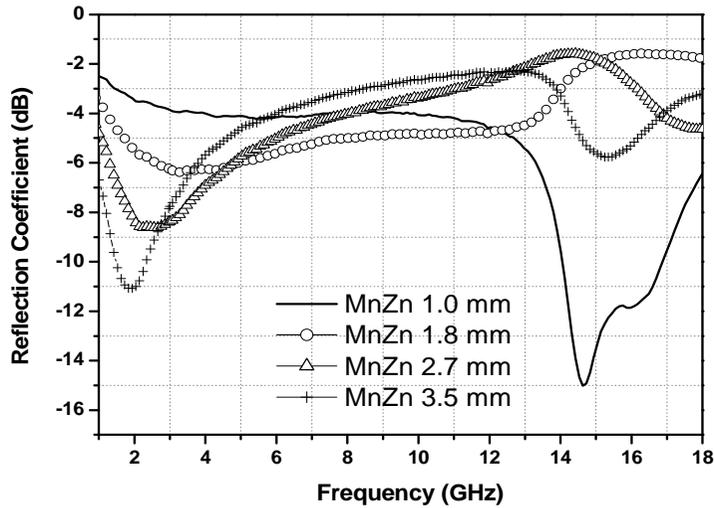


그림 5.12 두께 변화에 따른 MnZn페라이트 전파흡수능 변화

Fig. 12 MnZn ferrite EM wave absorber with different thickness.

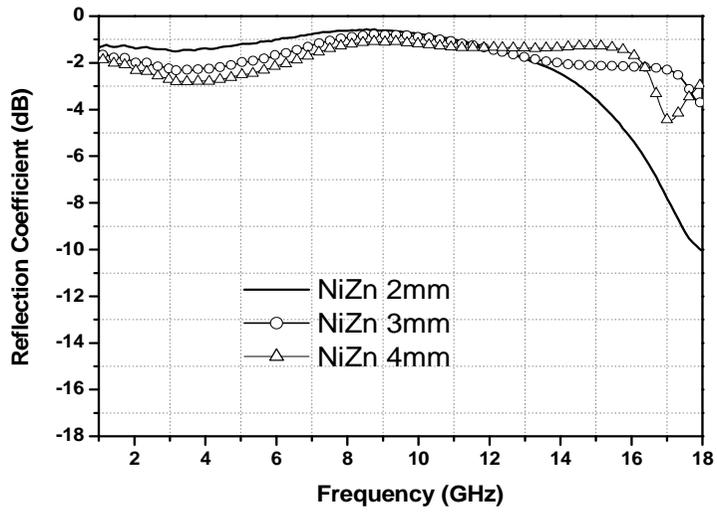


그림 5.13 두께 변화에 따른 NiZn페라이트 전파흡수능 변화
 Fig. 5.13 NiZn ferrite EM wave absorber with different thickness.

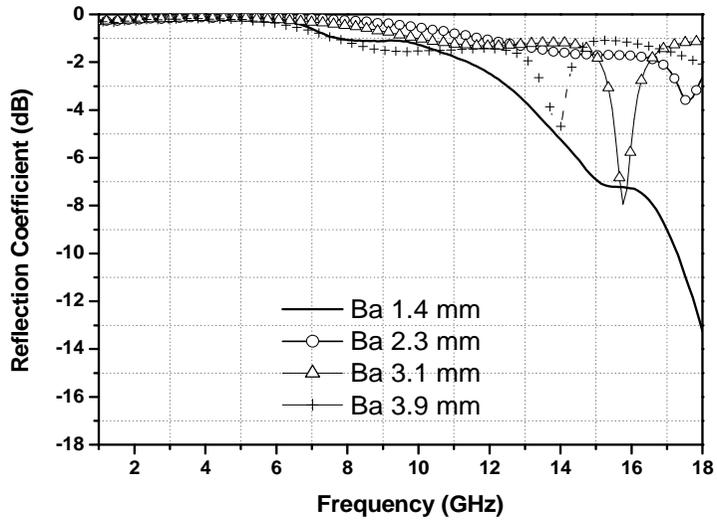


그림 5.14 두께 변화에 따른 Ba페라이트 전파흡수능 변화
 Fig. 5.14 Ba ferrite EM wave absorber with different thickness.

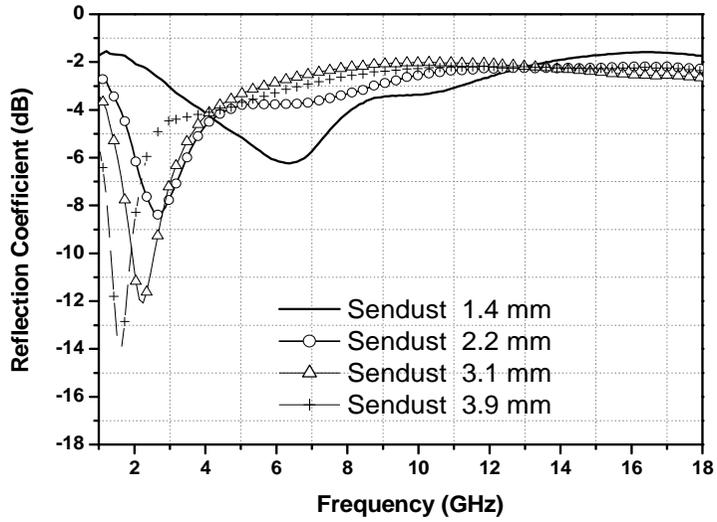


그림 5.15 두께 변화에 따른 Sendust 전파흡수능 변화

Fig. 5.15 Sendust ferrite EM wave absorber with different thickness.

2. 단층 금 도금 도전섬유를 전자파 투과면에 부착할 시 전파흡수능 변화

위의 단층 알루미늄 도전섬유를 전자파 투과면에 부착할 시 실험 측정과 마찬가지로 이번에는 금도금 섬유를 사용하여 같은 실험을 진행하였다. 그림 5.16부터 그림 5.18까지는 금도금 도전섬유를 전자파 투과면에 부착하였을 때의 두께변화에 따르는 전파흡수능 변화이다.

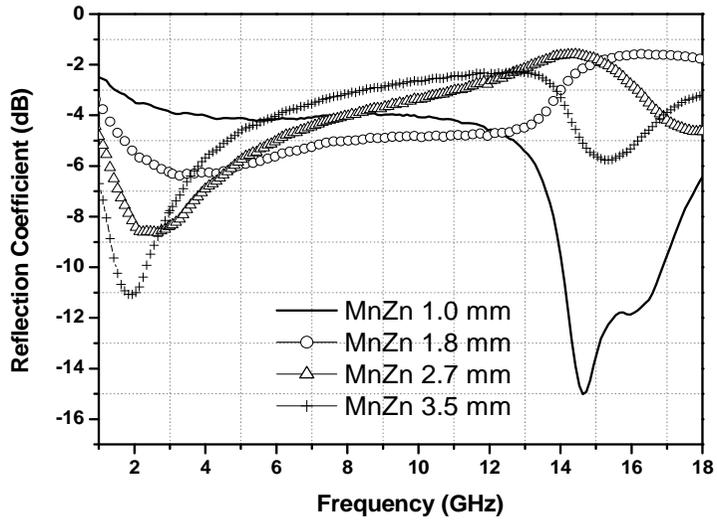


그림 5.16 두께 변화에 따른 MnZn페라이트 전파흡수능 변화
 Fig. 5.16 MnZn ferrite EM wave absorber with different thickness.

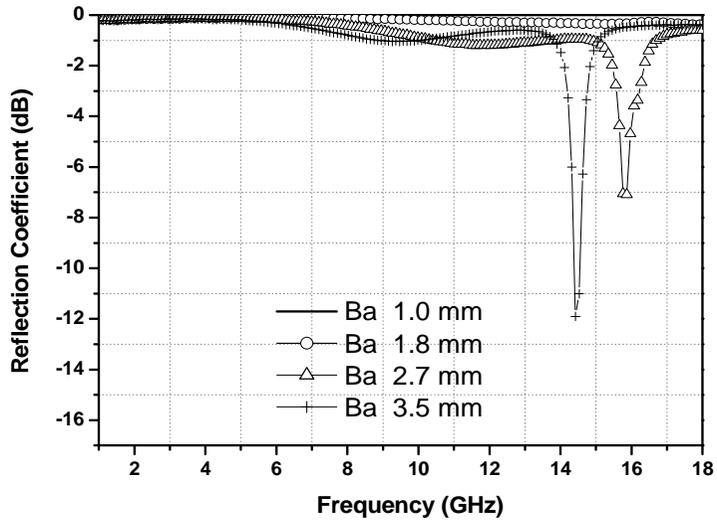


그림 5.17 두께 변화에 따른 Ba페라이트 전파흡수능 변화
 Fig. 5.17 Ba ferrite EM wave absorber with different thickness.

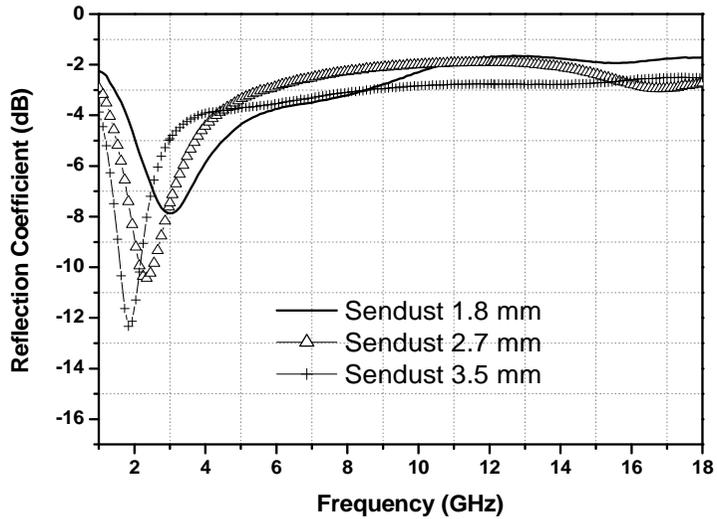


그림 5.18 두께 변화에 따른 Sendust 전파흡수능 변화

Fig. 5.18 Sendust ferrite EM wave absorber with different thickness.

5.3.3 섬유를 흡수체 중간층에 첨가할 때 전체 두께 변화에 따른 흡수능 변화

1. 알루미늄도금 도전섬유를 전파흡수체 중간에 첨가할 때 두께 변화에 따른 전파흡수능 변화

그림 5.19부터 그림 5.21까지는 알루미늄 도금 섬유를 전파흡수체의 중간에 첨가할 때 MnZn페라이트, Ba페라이트, Sendust전파흡수체의 두께변화에 따르는 전파흡수능 변화 그래프이다. 그림에서 표시된 각 전파흡수체의 두께는 섬유 시트를 중간에 첨가하여 제작된 총 두께이다.

그림 5.22부터 그림 5.24까지는 금 도금 섬유를 전파흡수체의 중간에 첨가할 때 MnZn페라이트, Ba페라이트, Sendust전파흡수체의 두께변화에 따르는 전파흡수능 변화 그래프이다.

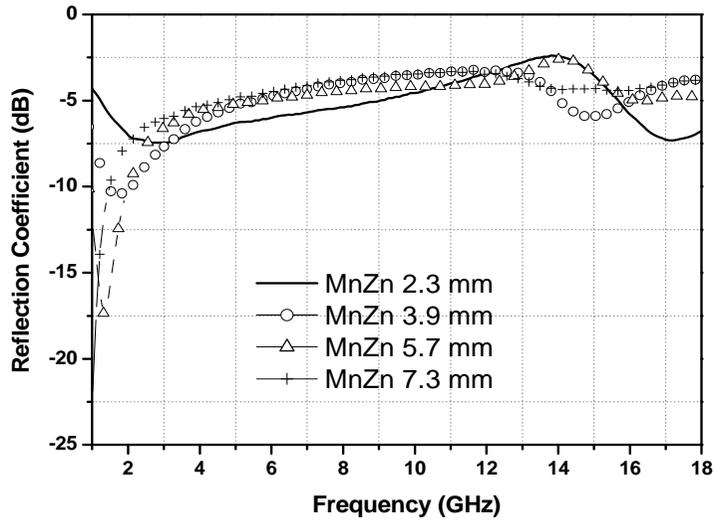


그림 5.19 두께 변화에 따른 MnZn페라이트 전파흡수능 변화
 Fig. 5.19 MnZn ferrite EM wave absorber with different thickness.

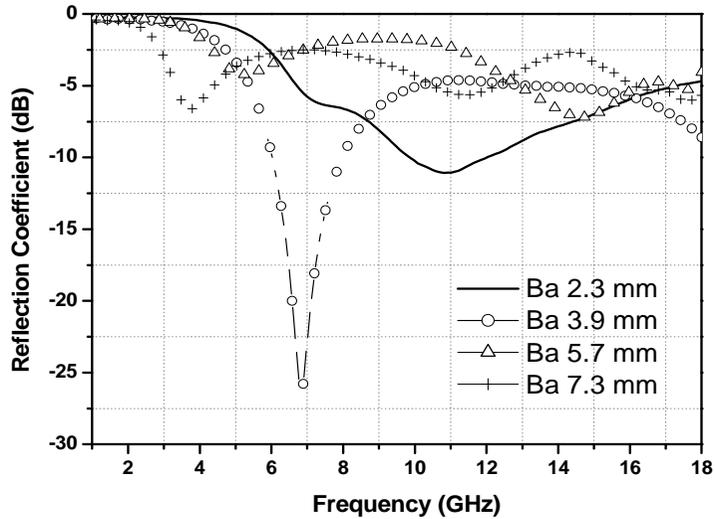


그림 5.20 두께 변화에 따른 Ba페라이트 전파흡수능 변화
 Fig. 5.20 Ba ferrite EM wave absorber with different thickness.

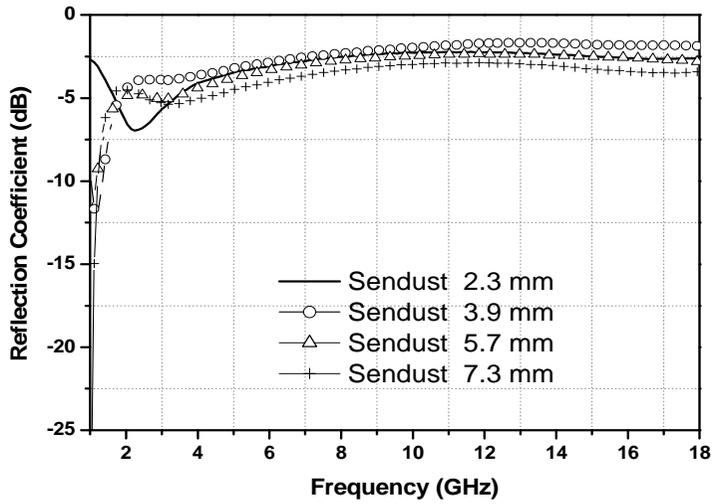


그림 5.21 두께 변화에 따른 Sendust 전파흡수능 변화

Fig. 5.21 Sendust ferrite EM wave absorber with different thickness.

2. 금 도금섬유를 전파흡수체 중간에 첨가할 때 두께 변화에 따른 전파흡수능 변화

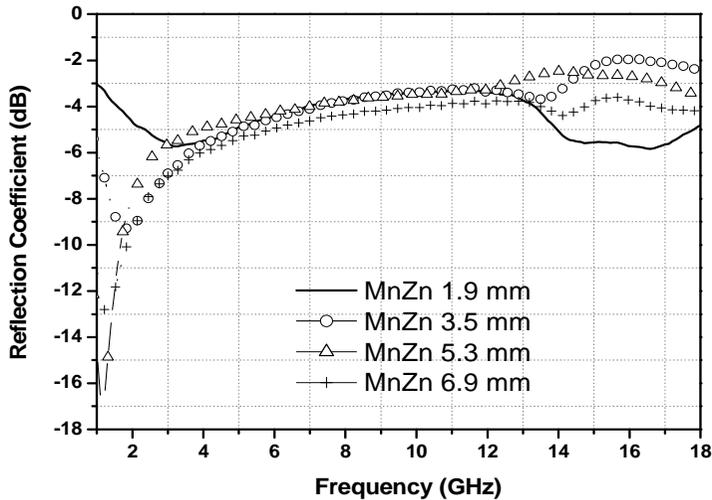


그림 5.22 두께 변화에 따른 MnZn페라이트 전파흡수능 변화

Fig. 5.22 MnZn ferrite EM wave absorber with different thickness.

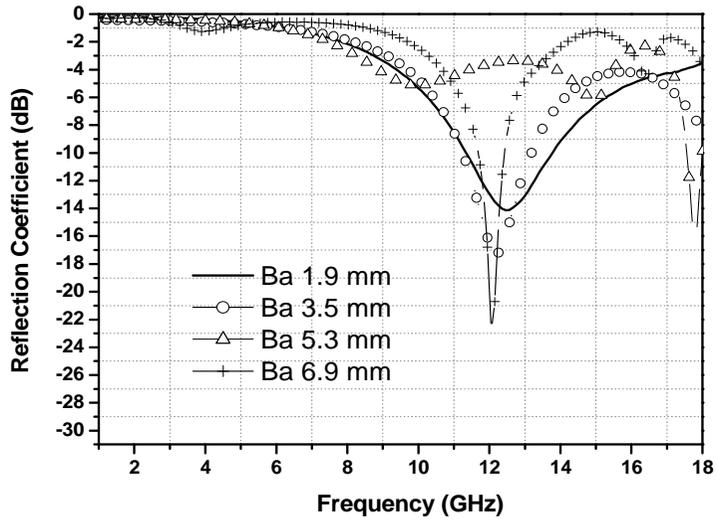


그림 5.23 두께 변화에 따른 Ba페라이트 전파흡수능 변화
 Fig. 5.23 Ba ferrite EM wave absorber with different thickness.

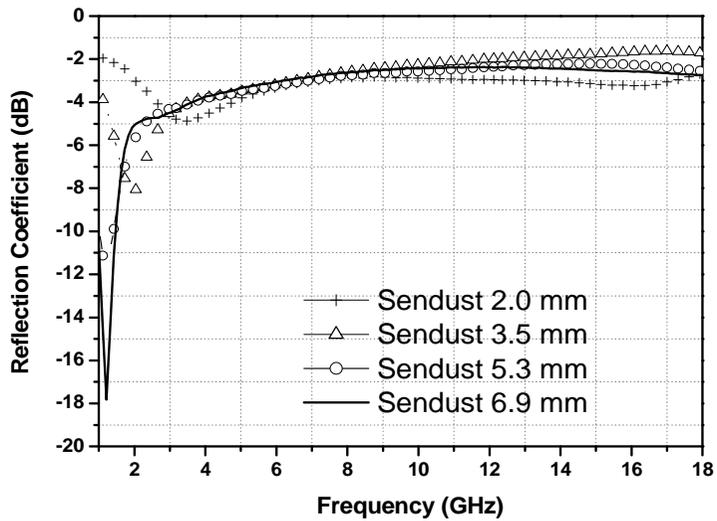


그림 5.24 두께 변화에 따른 Sendust 전파흡수능 변화
 Fig. 5.24 Sendust ferrite EM wave absorber with different thickness.

5.3.4 알루미늄 도금섬유의 두께(층수) 변화에 따른 복합전파흡수체의 전파흡수능 변화

1. MnZn ferrite 전파흡수체에 알루미늄 도금섬유를 부동하게 삼입하였을 때의 전파흡수능변화

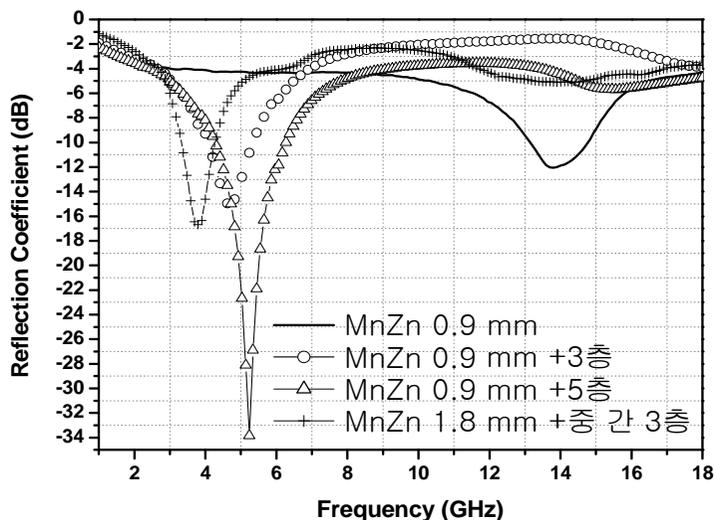


그림 5.25 MnZn ferrite 전파흡수체에 알루미늄 도금섬유를 부동하게 삼입하였을 때의 전파흡수능변화

Fig. 5.25 MnZn ferrite EM wave absorption ability attached by gold-plated fiber on the bottom of absorber.

그림 5.25에서 실선 그래프는 두께가 0.9mm 인 MnZn ferrite 전파흡수체의 전파흡수능 변화이고 다음 세 가지 그래프는 0.9mm 인 MnZn ferrite 전파흡수체의 투과면에 3층 두께(0.75mm)의 알루미늄 도금 섬유를 첨가할 때 복합 전파흡수체의 전파흡수능 변화, 0.9mm 인 MnZn ferrite 전파흡수체의 투과면에 5층 두께(1.25mm)의 알루미늄 도금 섬유를 첨가할 때 복합 전파흡수체의 전파흡수능 변화, 그리고 1.8mm 인 MnZn ferrite 전파흡수체의 중간에 3층 두께(0.75mm)의 알루미늄 도금 섬유를 첨가할 때 복합 전파흡수체의 전파흡수능 변화이다.

이 실험에서 관찰할 수 있는바와 같이 일정한 두께의 알루미늄 도금 섬유시트를 첨가한 복합전파흡수체의 전파흡수능은 첨가하지 않을 때와 비교하면 모두 뚜렷한 증가가 증가를 보였다.

2. Sendust 전파흡수체에 알루미늄 도금섬유를 부동하게 삼입하였을 때의 전파흡수능변화

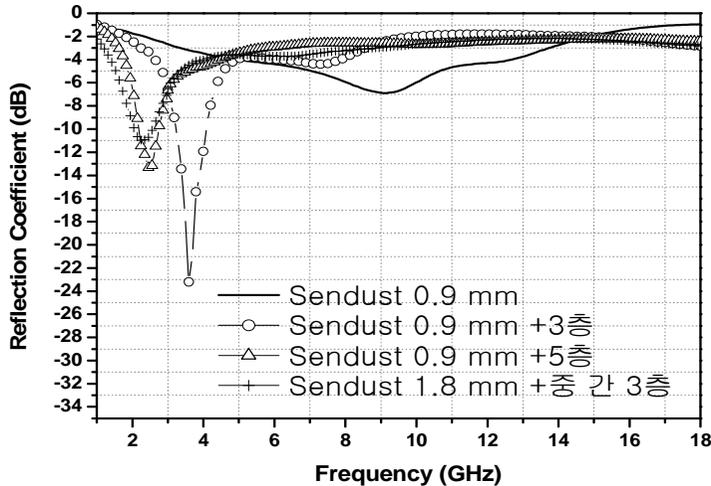


그림 5.26 Sendust 전파흡수체에 알루미늄 도금섬유를 부동하게 삼입하였을 때의 전파흡수능변화

Fig. 5.26 Sendust ferrite EM wave absorption ability attached by alumina-plated fiber on the bottom of absorber.

그림 5.26에서 실선 그래프는 두께가 0.9mm 인 Sendust 전파흡수체의 전파흡수능 변화이고 다음 세 가지 그래프는 0.9mm 인 Sendust 전파흡수체의 투과면에 3층 두께(0.27mm)의 알루미늄 도금 섬유를 첨가할 때 복합 전파흡수체의 전파흡수능 변화, 0.9mm 인 Sendust 전파흡수체의 투과면에 5층 두께(0.45mm)의 알루미늄 도금 섬유를 첨가할 때 복합 전파흡수체의 전파흡수능 변화, 그리고 1.8mm 인 Sendust 전파흡수체의 중간에 3층 두께(0.27mm)의 알루미늄 도금 섬유를 첨가할 때 복합 전파흡수체의 전파흡수능 변화이다.

이 실험에서 관찰할 수 있는바와 같이 일정한 두께의 알루미늄 도금 섬유시

트를 첨가한 복합전파흡수체의 전파흡수능은 첨가하지 않을 때와 비교하면 모두 뚜렷한 증가가 증가를 보였다.

종합하면 금도금 섬유시트를 첨가할시 그림 5.16, 5.17, 5.18, 5.29의 전파흡수능은 첨가하지 않을시 그림 5.8로부터 그림 5.11의 전파흡수능과 중심 공진 주파수를 비교하면 뚜렷한 변화가 보이지 않는다. 이것은 금도금 섬유시트의 표면비저항이 매우 작는데($0.1 \Omega/\text{cm}^2$)다시 말하면 전도성손실이 매우 작고 또한 섬유는 단층 구조이기 때문에 다층 반사손실이 일어나지 않기 때문이라고 분석된다. 알루미늄도금 섬유를 첨가할 때에 그림 5.12, 5.13, 5.14, 5.15는 첨가하지 않은 그림 5.8로부터 그림 5.11의 전파흡수능과 비교하면 마찬가지로 뚜렷한 변화를 관찰할 수 없다. 그림 5.25와 5.26에서 알루미늄 도금 섬유의 두께(층수)를 증가할 때는 전파흡수능이 뚜렷이 제고되는 것을 관찰할 수 있는데 이는 알루미늄 금속 도금 섬유에 전파가 입사하면 도전손실과 다층반사손실이 작용한다는 것을 의미한다. 이것은 일정한 도전성/고투자율을 가진 금속 섬유가 전파흡수체의 개발에 비교적 적합하다는 것을 설명한다. 도전성 섬유시트를 전파흡수체 중간에 첨가할 때 그림 5.19로부터 그림 5.24 그래프를 분석하면 전파흡수능에는 뚜렷한 변화가 없고 반면에 전파흡수체 제작 두께가 증가된다. 그리고 두께 증가에 따라 공진 중심 주파수가 저주파 방향으로 이동한다.

제 6 장 결론

본 논문에서는 도전성(직경이 $30\mu\text{m}$ 이하) 섬유를 기존에 사용하고 있는 전파 흡수재료(MnZn페라이트, NiZn페라이트, Ba페라이트, Sendust)와 복합하여 전파 흡수체를 제작하였으며 그 특성에 대하여 기초적인 연구를 수행하였다.

실험결과 표면비저항이 작고 차폐효율이 큰 금도금 섬유는 전파흡수능 향상에서 큰 변화가 없으나 전자파 차폐효율이 매우 좋으며 섬유 자체가 매우 얇고(두께가 0.09mm), 경량이며 또한 그 재질이 탄탄하여 투과파를 허용하지 않는 전파흡수체 개발에서 매우 좋은 특성을 나타내었다.

그러나 일정한 표면비저항이 있는 알루미늄 도금을 한 섬유는 섬유를 사용하지 않을 때와 비교하면 다소나마 향상된 전파흡수능을 나타내는데 이는 섬유 자체가 전자파에 대한 반사손실과 전파흡수손실이 작용한다는 것을 설명한다. 전자파에 대한 차폐효율은 금도금 섬유보다 못하지만 전자파 차폐효율은 최소 10dB 이상으로 $1\sim 18\text{GHz}$ 범위에서 평균 약 20dB 이상으로 나타나기에 대부분 전파를 차단함으로 역시 투과파를 허용하지 않는 전파흡수체 개발에서 매우 좋은 재료로 평가된다. 마찬가지로 그 섬유 자체도 매우 얇고(두께가 0.25mm), 경량이며 또한 그 재질이 탄탄하다.

실험결과를 종합하면 다음과 같은 결과를 가질 수 있다.

1. 투과파를 허용하지 않는 전파흡수체용으로 적합하다.
2. 경량, 얇은 도전 섬유는 전파흡수체의 개발에서 지지재로 사용 가능하다.
3. $30\mu\text{m}$ 이하의 일정한 도전성/고투자율을 가진 금속 섬유가 전파흡수체의 개발에 비교적 적합하다.
4. 고 도전성 도전 시트는 매우 좋은 전자파차폐 효과는 있으나 전파흡수능 개선에는 적합하지 않다.

위의 결과에 의해 알 수 있듯이 투과파를 허용하지 않는 전파흡수체 개발에서 얇고 경량이며 일정한 전도손실과 반사손실이 있는 극세 도전성 섬유시트는 매우 좋은 첨가 재료로 작용하여 실제 제작 응용에도 가능한 것으로 분석 되었다.

참고 문헌

- [1] 山浦 逸雄, 工業材料3rd, 1994.
- [2] A. Tsaliovich, "Electromagnetic Shielding Handbook for Wired and Wired and Wireless EMC Applications", Kluwer Academic Publishers, Boston, Jan. 1991.
- [3] Hewlett Packard, 97' EMC Measurements Seminar, 1997.
- [4] 김능수, 이일형, 전자파장해, 산업기술정보원, 서울, 1991.
- [5] 전자파인체보호기준(정보통신부고시 제2000-91호).
- [6] 전자파흡수율 측정기준(정보통신부고시 제2000-93호).
- [7] 김동일, 전파흡수원리, 다솜출판사, 2005.
- [8] Development of Electromagnetic Shield Housing with FINE Metal Fiber, Development of Functional Parts & Materials for Information and Communication, 한국과학기술연구원 과학기술부 2002. 5.
- [9] D. A. McNamara, C. W. Pinstorius and J. A. G. Malherbe, Introduction of the Uniform Geometrical Theory of Diffraction, Artech House, 1990.
- [10] 林 典史, 田中健二, 住友輕金屬技報, 1988, pp. 154.
- [11] Sang Hyun Moon, Seung Jae Sin, Jae-Man Song, Dong Il Kim and Ki Man kim, "Development of Composite Ba Ferrite EM Wave Absorbers for GHz Frequency", 韓國電子工學會論文誌, Dec. 2003.
- [12] Y. Naito, Electromagnetic Wave Absorbers, New Ohm, Tokyo, pp. 86.
- [13] 橋本修, 電波吸收體入門, 森北出版社, p. 13, 1997.
- [14] 이중배, 전자신문, Aug. 1996.

감사의 글

머나먼 중국이라는 곳에서 한국 부산에 있는 한국해양대학교에 와서 전과공학을 전공하리라고는 꿈에도 생각지 못하였습니다. 아마 이것이 사람의 운명인가 봅니다. 처음 입학하여 학교생활을 다시 시작하는 가운데 참으로 많은 애로가 많았습니다. 환경이 다르면 사람들의 사유와 생활 습관이 같지 않습니다. 그 결과 많은 면에서 서로 이해하지 못하는 부분도 많았습니다. 하여간 처음 반년간은 생각을 서로 맞추고 이해하려고 하니 저도 모르게 매우 힘들었습니다. 하지만 그러는 가운데 저의 지도교수인 김동일 교수님이 저를 이해해주고 많은 관심을 준 덕분에 석사 과정을 끝내 마치게 되었습니다. 이 글을 통해서 김동일 교수님께 진심으로 감사의 마음을 전합니다.

아울러 저의 졸업논문을 위하여 논문 주제를 설정하여 주시고 논문 정리 교정 등 여러 방면에서 아낌없는 도움을 주신 송재만 박사님께도 진심으로 감사를 드립니다.

그리고 저의 논문심사를 위하여 심혈을 기울여 주신 조형래 교수님, 정지원 교수님께도 감사를 드리며 또한 이 기회를 빌어서 전과공학 석사과정동안 많은 도움을 주신 운영 교수님, 그리고 최동묵 선생님, 이외에도 저에게 많은 관심을 주신 민경식 교수님과 강인호 교수님 그리고 김기만 교수님에게도 감사를 드립니다.

다음에 2년간 마이크로파 실험실에서 같이 생활하여 온 한국 학생들의 뜨거운 관심에 감사를 드리며 특히 힘들 때나 기쁠 때나 항상 곁에서 같이 웃어주고 달래주는 중국 청황도에서 온 박사과정에 있는 루이에게 이 글을 빌어서 진심으로 감사를 드립니다. 또한 이 글을 빌어 마이크로파실험실에서 같이 생활하여 온 한국 학생들이 희망찬 내일을 기원합니다. 그리고 항상 환한 웃음으로 반겨 주던 부산방송국의 원영수 국장님과 KBS방송국 박우근 부장님에게 진심으로 감사를 드립니다.

마지막으로 하고 싶은 말은 부산 영도구에 자리 잡은 한국해양대학교는 푸른 한 바다 속에 자리 잡은 매우 아름다운 섬 학교로서 영원히 나의 가슴속에 간직하겠습니다.