

전파흡수체의 동작원리 및 응용

김성수

충북대학교 재료공학과
충북 청주시 개신동 360-768

(1994년 9월 6일 받음)

I. 서 론

전파흡수란 전파에너지를 열에너지로 변환시키는 것이다. 전자레인지에서 음식을 데이는 것이 전파흡수현상을 이용한 대표적인 예이다. 저항체에 전류가 흐를 때 열이 발생하는 것도 넓은 의미에서 일종의 전파흡수현상이다. 이런 의미에서 전파흡수체는 일종의 열변환기로 볼 수 있다. 전파흡수체의 흡수 Mechanism은 근본적으로 물질의 고주파 손실 특성에 기인하는 것으로 사용 재료에 따라 크게 도전손실재료, 유전손실재료, 자성손실재료로 분류된다. 이들 재료 중에서 Ferrite 전파흡수체는 주로 공명현상에 의한 자성손실을 이용한 것으로 두께가 비교적 작고, 정합 주파수가 다양하여 산업적으로 가장 많이 이용되고 있다.

최근 들어 전파흡수체에 대한 관심이 고조되고 있는 것은 전자 및 통신기기의 수요 확산과 군사용도로 이 재료의 응용분야가 다양하기 때문이다. 여러가지 전자부품이 집적화되고, 다양한 통신기기들이 Network을 형성하여 작동하는 추세에서 전파간섭에 의한 오작동 또는 전파공해가 큰 문제로 대두되고 있다. 전파흡수체는 이러한 문제 해결에 효과적으로 사용되어 질 수 있다. 현재 전파흡수체는 전자기기의 누설 전파 방지[1], TV 고스트 방지[2], 전파 암실[3], 레이더파 반사 방지[4] 등에 널리 쓰이고 있다.

본 고에서는 전파흡수체의 기본 원리와 설계기법, 전파흡수체의 고주파 손실 및 전파흡수특성, 응용분야에 대해 서술하고자 한다. 전파가 매질과 만났을 때 일어나는 전파의 반사, 투과, 흡수 현상을 기술하고 이들 특성과 재료의 투자율, 유전율의 상관관계, 그리고 이를 이용한 흡수체 설계 방안에 대해 소개하였다. 전파흡수재료 중에는 현재 가장 많이 사용되고 있는 Ferrite 자성 손실체에 대해 주로 기술하였다.

II. 전파흡수체의 동작원리

1. 전파의 반사, 투과, 흡수

전파는 전자파(전계와 자계로 구성된 파)의 일종으로

일반적으로 9kHz-3THz 주파수 범위에 있는 파를 통칭한다. 전파가 공기 중을 전송하다가 다른 매질을 만나게 되면 빛과 마찬가지로 일부는 반사되고 일부는 투과한다. 투과된 전파도 매질의 손실 특성에 의하여 감쇠(흡수)되어 질 수 있다. 이러한 현상을 도식화하면 Fig. 1과 같다. 이종 물질의 경계면에서 일어나는 전파의 반사, 투과 그리고 흡수는 그 매질의 복소유전율($\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r''$)과 복소투자율($\mu_r = \mu_r' - j\mu_r''$)에 의해 결정된다. 여기서 ϵ_r' , μ_r' 은 전파에너지의 축적을 의미하는 실수항이고 ϵ_r'' , μ_r'' 은 손실에 해당되는 허수항이다.

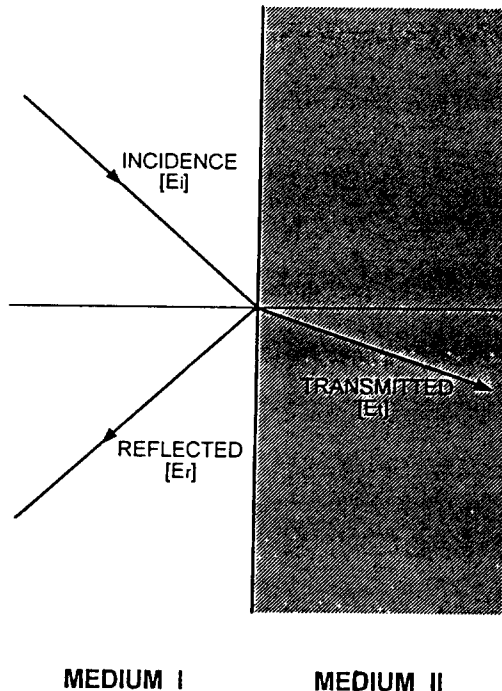


Fig. 1. Schematic description of reflection and transmission of electromagnetic wave.

경계면에서 전파의 반사는 매질의 임피던스에 의해 결정된다. 임피던스는 전파의 전계 (E)와 자계 (H) 성분비

로 정의되는데 식 (1)에서와 같이 매질의 투자율 대 유전율 비의 제곱근으로 표시된다.

$$Z = \frac{|E|}{|H|} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (1)$$

Fig. 1에서 매질 I로부터 매질 II로 전송하는 전자파의 입사파, 반사파, 투과파의 전계를 각각 E_i , E_r , E_t 라 하면 경계면에서 반사계수(S)와 투과계수(T)는 각각 다음 식 (2)와 (3)으로 주어진다.

$$S = \frac{E_r}{E_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (2)$$

$$T = \frac{E_t}{E_i} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (3)$$

여기서 Z_1 과 Z_2 는 각각 매질 I과 매질 II의 임피던스이다. 경계면에서 전자파의 반사가 일어나지 않기 위해서는 ($S = 0$), 매질 I과 매질 II의 임피던스가 같아야 하고 ($Z_1 = Z_2$), 이러한 조건을 임피던스 정합이라고 부른다. 임피던스 정합이 이루어졌을 때 입사파는 모두 매질 II로 투과되고 그 때의 투과계수는 $T=1$ 이 된다.

투과된 전자파는 매질의 손실특성 (투자율, 유전율의 허수부)에 의해 Fig. 2에서와 같이 전송길이 (z)에 따라 그 크기가 지수적으로 감소한다, 전자파의 감쇠크기는 감쇠정

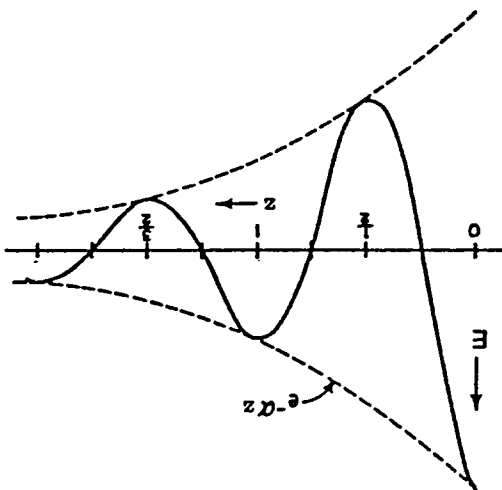


Fig. 2. Attenuation of electromagnetic wave in a lossy media.

수 (α)로 표시되는데, α 는 다음 식으로 정의되는 손실계수 ($\tan \delta$)가 커질수록 증가한다.

$$\tan \delta = \frac{\text{에너지손실}}{\text{에너지축적}} = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} \text{ or } \frac{\mu_r''}{\mu_r'} \quad (4)$$

투자율, 유전율의 허수부 (손실항)가 커질수록 전자파는 매질에 의해 감소되고 열로 변환된다. 대표적인 예가 물로서 유전손실계수 ($\tan \delta_e$)가 커서 전자레인지 오븐에서 음식이 덥어지는 것이다.

2. 전파흡수원리

1) 감쇠형 전파흡수체 (공명형 전파흡수체)

전파흡수체의 구비조건은, 첫째 계면에서 전자파의 반사가 일어나지 않도록 재료의 임피던스가 공기와 같아야 하고, 둘째 재료의 손실계수가 커서 투과된 전자파가 급격히 감쇠되어야 한다. 첫째 조건인 임피던스 정합이 이루어지기 위해서는 재료의 유전율과 투자율 사이에 다음 식이 만족되어야 하나,

$$\epsilon_r = \mu_r \quad (5)$$

현재까지 이러한 재료는 합성이 용이치 않다. 이를 해결하는 방안으로 전파흡수체의 기하학적 형태를 조절하거나 다층화하는 방법이 이용되고 있다. Fig. 3에서와 같이 다층화하거나, 흡수체 모양을 피라미드 형태로 바꿈으로써 표면 근처에서는 재료의 특성을 공기의 특성과 유사하게 만들고 흡수체 내부로 들어갈수록 손실계수가 커지게 만드는 것이다. 이러한 원리의 흡수체는 두께가 커지는 문제점을 갖고 있으나 광대역에 걸쳐 전파흡수특성이 우수하여 전파무향실 (Anechoic Chamber) 등에 이용되고 있다 (Fig. 4).

2) 1/4 파장두께 전파흡수체 (정합형 전파흡수체)

금속은 전기전도도가 높기 때문에 전자파를 완전히 반사시킨다. 이를 방지하기 위해 Fig. 5에서와 같이 금속판 위에 전파흡수체를 코팅하거나 도포시킨다. 이 경우 무반사 흡수체의 설계조건은 감쇠형 흡수체와 다르다. 금속판 위에 도포된 단층형 전파흡수체의 흡수원리를 설명하면 다음과 같다.

- ① 전파흡수체에 전자파가 입사되면 (전계 E_0), 식 (2)와 (3)에 의해 일부는 표 면에서 반사되고 (E_{r1}), 나머지는 전파흡수체의 내부로 투과된다 (E_{t1}).
- ② 내부로 투과된 파는 전파흡수체의 감쇠정수에 의해 지수함수로 감쇠한다.

- ③ 전파흡수체 배면의 금속판에 도달하면 전파가 완전히 반사된다.
 - ④ 반사파는 다시 전파흡수체 중에서 감쇠되면서 전파흡수체 표면에 도달한다(이 때, 전계 E_{b2}).
 - ⑤ 역행파 E_{b2} 는 흡수체 표면에서 일부 반사되어 흡수체 내부로 되돌아 가고(E_{t2}), 나머지는 투과되어 전파흡수체 외부로 빠져나간다(E_{r2}).
- 흡수체 표면에서의 반사파를 모두 합하면 반사계수 S 는 다음과 같이 표시 되어진다.

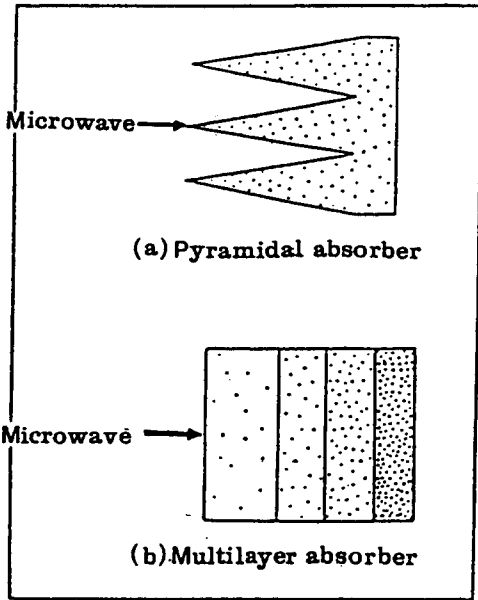


Fig. 3. Typical form of thick and wide-band absorbers; (a) pyramidal and (b) multilayer.

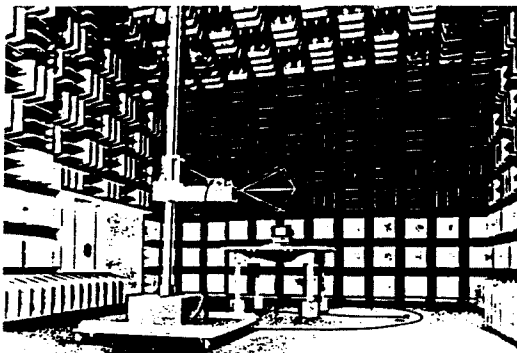


Fig. 4. Application of wide-band absorber in anechoic chamber.

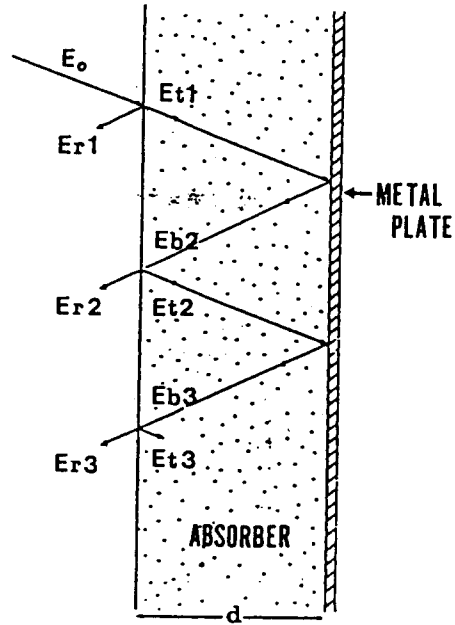


Fig. 5. Principles of quarter-electrical-wavelength thick absorber.

$$S = \frac{E_r}{E_o} = \frac{\sum_{n=1}^n E_m}{E_o} \quad (6)$$

전파의 감쇠는 경로에 따라 지수적으로 감쇠함으로 1 회외 왕복시에 대부분의 감쇠가 일어난다고 볼 수 있다. 따라서 반사전계 E_{r1} 과 E_{r2} 사이에 180° 의 위상차가 생기면 전파흡수체의 반사계수가 0이 된다. 흡수체의 두께가 파장의 $1/4$ 이 되었을 때 이러한 조건이 만족됨으로 이러한 흡수체를 $1/4$ 파장두께 전파흡수체라 부른다. 반사전계 E_{rn} 을 파동함수로 표시하여 무반사조건($\sum E_{rn} = 0$)을 구하면 다음과 같이진다.

$$\sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tanh \left[j \frac{2\pi d}{\lambda} \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \right] = 1 \quad (7)$$

여기서 d 는 흡수체의 두께, λ 는 전파의 파장이다. (7)식이 만족되었을 때 임피던스 정합이 이루어졌다고 말하고, 주어진 재료정수 (μ_r, ϵ_r)에서 (7)식을 만족하는 흡수체의 두께와 전파의 주파수를 각각 정합두께 (d_m), 정합주파수 (f_m)라 부른다.

III. 전파흡수재료의 종류

전파흡수체는 사용재료에 따라 다음과 같이 크게 4가지로 분류된다.

- ① 도전성 전파흡수재료
- ② 유전성 전파흡수재료
- ③ 자성 전파흡수재료
- ④ 혼합형 전파흡수재료

도전성 전파흡수재료로는 저항체, 저항선 또는 저항피막 등이 사용되고 입사파에 의해 유기되는 도전 전류에 의해 전파를 흡수한다. 도전성 손실재료에는 카본 분말, 탄소섬유[5] 등이 사용되며 지지재료는 각종 고무 및 플라스틱등이 사용된다. 유전성 전파흡수재료는 유전 손실 계수가 큰 재료를 사용하여 전파를 흡수하는 것으로 BaTiO₃, PMN-PT[6] 등이 사용된다. 자성손실을 유발하는 손실재료로는 금속 자성재료와 산화물 자성재료 등이 있지만 전파흡수체에는 주로 산화물 자성재료가 사용되고 있다. 혼합형 전파흡수재료[7]는 위의 손실재를 조합하여 투자율과 유전율을 동시에 조절하는 재료이다. 도전성 손실재료는 두께가 두꺼워 제한된 부분에 사용되어지고 유전손실은 고주파 영역에서 일반적으로 크지 않기 때문에 실용적이지 못하다. 여기에서는 주로 산화물 자성 손실재에 대해 자세히 기술한다.

1. 소결 페라이트

고주파 영역에서 페라이트의 자기손실[8] [9]은 이력(Hysteresis) 손실, Eddy Current 손실, 잔류손실 3가지로 구별된다. 이력손실은 강자성체에서 반드시 존재하는 손실이며, Eddy Current 손실은 주파수에 비례하여 증가하는 손실이다. 그러나 페라이트의 경우는 전기저항이 크기 때문에 Eddy Current 손실이 크지 않으므로 고주파 영역에서는 잔류손실이 가장 중요하다. 페라이트의 잔류손실은 자벽이동에 의한 공명, 자구회전에 의한 공명, 형상 공명손실 등으로 이루어져 있고 모두 주파수의 함수이다[10].

자기손실의 주파수 의존성은 복소투자율($\mu = \mu' - j\mu''$)로 표시된다. 대표적 예가 Smit와 Wijn[11]에 의해 제시된 Ni-Zn 페라이트에서 Zn⁺² 고용량에 따른 μ' , μ'' 의 주파수 의존성이다(Fig. 6). μ' 은 일정한 값을 유지하다가 어느 주파수를 넘어서면 떨어지고 1/2정도 감소한 주파수에서 μ'' 은 최대가 되고 있다. μ'' 이 최대인 주파수가 자연공명 주파수이다. 저주파 대역에서 μ' 이 높은 재료(Zn⁺² 고용량이 큰 재료)일수록 자연공명 주파수는 감소한다. Snoek[12]의 이론에 의하면 자연공명이

주로 회전자화에 의해 일어날 경우 공명 주파수 f_r 과 초기 투자율 μ 사이에는 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$f_r(\mu - 1) = vM_s \tag{8}$$

여기서 v 는 자이로 자기정수, M_s 는 포화자화이다.

Fig. 6의 복소투자율 분산곡선을 개략해서 도시하면 Fig. 7과 같다. 자연공명 주파수 f_r 보다 충분히 작은 주파

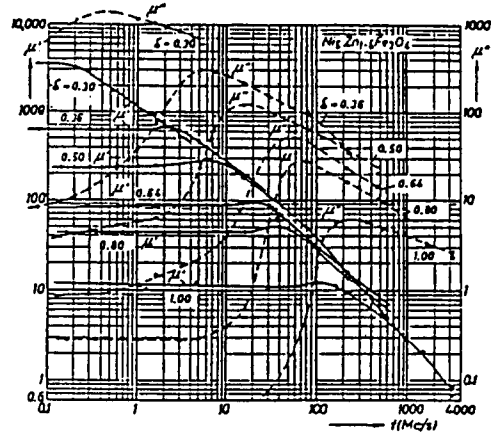


Fig. 6. Frequency dependence of real and imaginary parts of the permeability in Ni₈Zn_{1-δ}Fe₂O₄ ferrites [11].

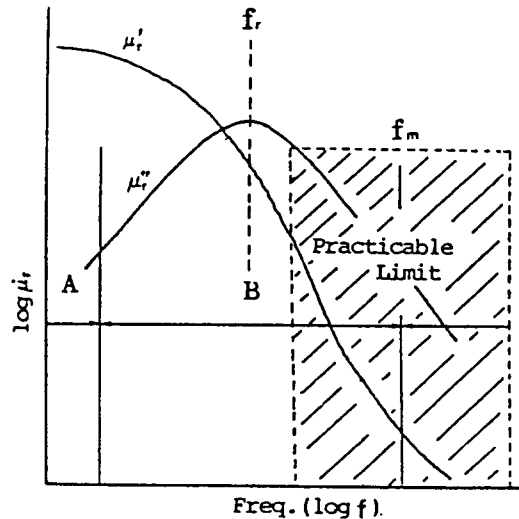


Fig. 7. Schematic diagram of typical permeability spectra observed in ferrites.

수에서 μ'' 은 충분히 작은 값을 갖고, 이 영역에서 페라이트는 저손실 자성체로 사용된다. f_r 보다 큰 주파수 영역에서는 μ'' 이 μ' 보다 커지게 되고, 주로 이 영역(빛금친 부분)이 전파흡수체로서 사용 범위이다. 따라서 재료에 따라 사용 주파수가 달라진다. 소결 Ni-Zn 페라이트의 경우 사용 주파수 범위는 1 GHz 미만임을 알 수 있다. Mn-Zn 페라이트는 Ni-Zn 페라이트에 비해 초기 투자율은 크지만 저주파에서 자기손실이 커 저주파용 전파흡수체로 사용된다.

2. 복합 페라이트

소결 페라이트는 VHF, UHF 대역에서 우수한 전파흡수 특성을 보이나, 1GHz 이상의 마이크로파 영역에서는 페라이트 분말을 고무나 플라스틱과 같은 절연물에 분산시킨 복합재료가 사용된다. 그 이유는 Fig. 8[13]에서와 같이 복합 페라이트의 경우 소결 페라이트에 비해 보다 고주파 영역에서 자기완화에 의한 손실특성이 관찰되기 때문이다. 이러한 현상은 연자성 페라이트를 폴리머수지에 복합화한 경우 나타나는 특징이다.

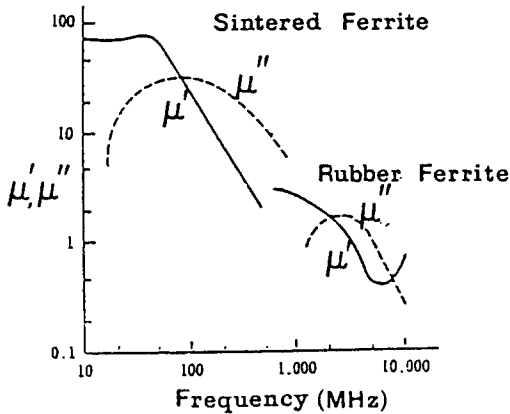


Fig. 8. Complex permeability spectra observed in sintered ferrite and rubber-ferrite[13].

이외에도 복합 페라이트 전파흡수체는 유연성을 가져 시공이 편리할 뿐 아니라 페라이트 분말과 비자성체와의 혼합비, 페라이트 분말의 입경에 의해 전자기적 특성을 제어할 수 있는 장점을 갖고 있다. Fig. 9[14]는 X-Band 주파수 영역(8-12.4 GHz)에서 복합 Ni-Zn ferrite의 분말 혼합비에 따른 재료정수 (μ_r, ϵ_r)의 주파수 분산 특성을 나타낸 것이다. 분말/고무의 무게비(F/R)가 증가할수록 μ_r' 은 감소하고 μ_r'' 은 증가한다. F/R

비 증가에 따라 ϵ_r' 은 증가함을 알 수 있다. 비교적 간단한 F/R비 변화에 의해 투자율, 유전율을 조절할 수 있고, 따라서 전파흡수 특성을 변화시킬 수 있음을 의미한다. Ferrite의 고주파 자화기구(자벽이동, 자구회전)을 고려해 볼 때 복합 Ferrite에서 Ferrite 입자경의 영향은 매우 중요하다. Fig. 10[13]은 Mn-Zn 복합 Ferrite에서 입자경에 따른 μ_r' 의 주파수 분산 특성을 변화시켜 보여주고 있다. 입자경이 작을수록 높은 주파수에서 공명이 일어남을 알 수 있다.

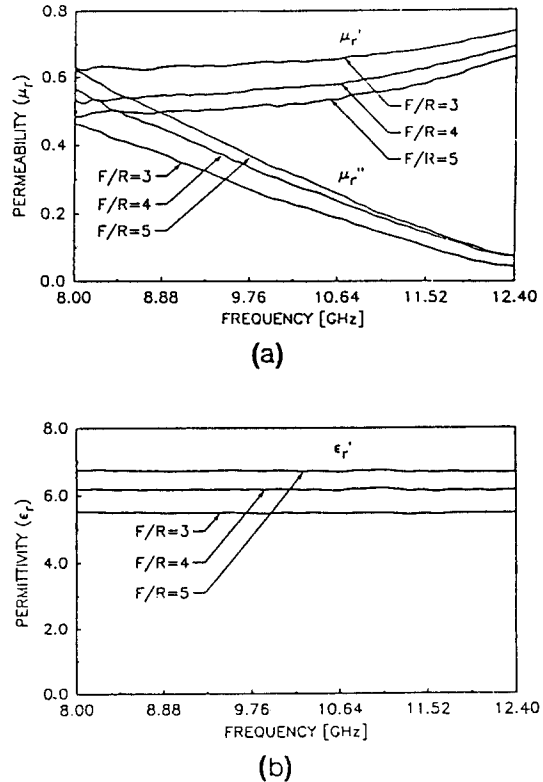


Fig. 9. Frequency dependence of (a) permeability and (b) permittivity observed in ferrite-rubber composite specimens[14].

IV. 전파흡수특성

1/4 파장두께 전파흡수체의 무반사 조건식에는 식 (7)에서와 같이 전파의 파장, 전파흡수체의 두께, 그리고 투자율과 유전율의 실수 및 허수의 6개의 변수가 들어간다.

흡수체의 재료정수(μ_r, ϵ_r)가 주어졌을 때 (7) 식을 만족하는 흡수체의 두께와 전파의 주파수를 각각 정합두께(d_m), 정합주파수(f_m)라 부르고 이런 조건하에서 완전 무반사 흡수체를 얻을 수 있다. Naito와 Suetake[15]는 UHF, VHF주파수 영역에서 정합 조건식 (식 (7))의 해를 구한바 있고, Musal과 Hahn[16]은 유전 손실 계수($\tan \delta_\epsilon$)까지 고려하여 Naito의 결과를 보완하였다.

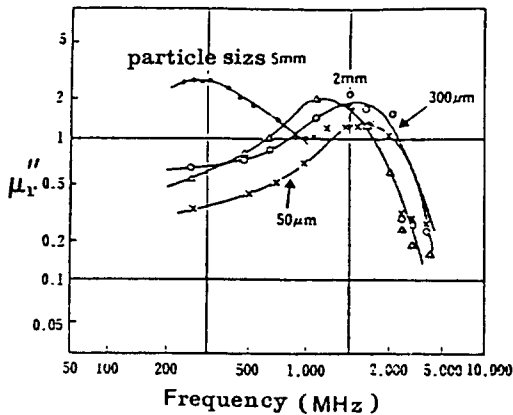


Fig. 10. Variation of imaginary part of permeability with ferrite particle size in Mn-Zn ferrite /rubber composites[13].

Fig. 11[14]은 마이크로파 영역에서 정합 조건식의 해를 구하여 도식화한 것이다. 이 도표를 이용하면 흡수체의 재료정수로부터 f_m 과 d_m 을 정확히 예측할 수 있다.

Fig. 12는 Ni-Zn 복합 Ferrite의 재료정수 (Fig. 9)를 가지고 f_m 과 d_m 을 구하는 한 예를 보여준 것이다. Fig. 9에서 $F/R=4$ 인 복합 Ferrite의 $\mu_r' - \mu_r''$ 궤적은 $\epsilon_r=6.1$ 인 곡선과 10.5GHz에서 만나고 있다. 이 점을 통과하는 d/λ 값은 0.12이기 때문에 f_m 은 10.5GHz이고 d_m 은 3.55mm로 계산되어진다. $F/R=4$ 인 복합 Ni-Zn Ferrite의 경우 두께를 3.55mm로 제작하였을 때 10.5GHz의 주파수에서 100%의 전파흡수특성을 보인다. Fig. 13은 동일 시편에서 두께를 달리하며 전파흡수특성을 직접 측정한 것이다. 3.55mm의 두께에서 흡수 성능이 가장 우수하며 10.5GHz에서 최대흡수가 일어남을 볼 수 있다. 다른 전파흡수체의 경우에도 재료정수 분산 특성을 정확히 알고 있으면 최대흡수가 일어나는 f_m 과 d_m 을 정확히 찾아낼 수 있다.

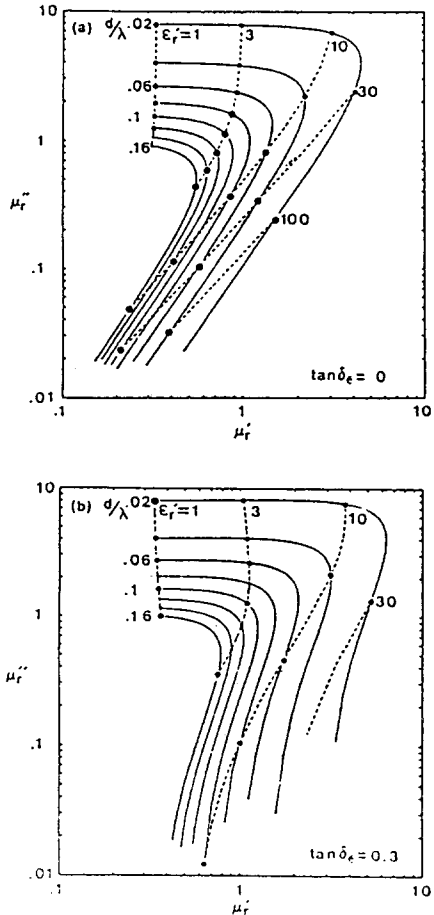


Fig. 11. Impedance-matching solution maps for zero reflection: (a) $\tan \delta_\epsilon=0$ and (b) $\tan \delta_\epsilon=0.3$ [14].

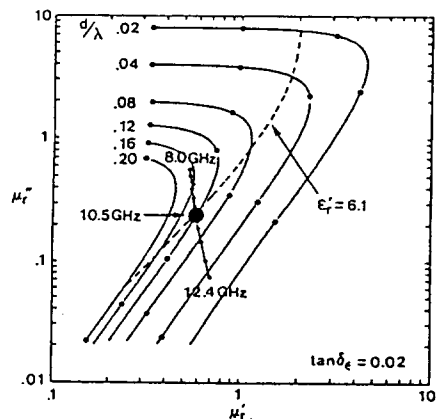


Fig. 12. A matching point of the Ni-Zn ferrite/rubber composite in the impedance-matching solution map[14].

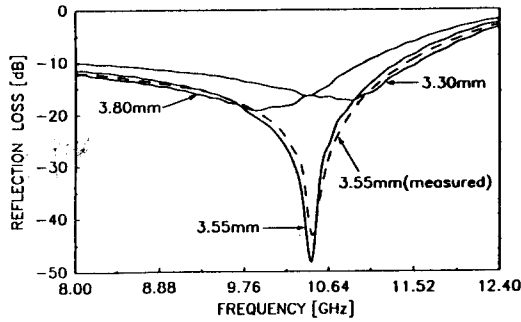


Fig. 13. Microwave absorbine properties of the Ni-Zn ferrite /rubber comopete specimens[14].

V. 전파흡수체의 응용

전파흡수체의 응용분야는 크게 EMI (전자파 간섭) 방지와 스텔스용 두가지로 분류된다. 스텔스용 전파흡수체는 주로 군사용으로 사용되고 있으며, 최근 전자기기의 사용증가에 따라 EMI 방지에 전파흡수체의 수요가 크게 늘어날 전망이다. 대표적인 응용예를 소개하면 다음과 같다.

1) TV 고스트 대책용 전파흡수체

TV 송신 전파가 도심의 고층 건물에서 반사되어 TV 화면에 고스트현상이 일어난다. 건물의 벽면에 전파흡수체를 타일 형태로 부착하여 이러한 전파장애를 해소시키고 있다. 현재 일본에서 전파흡수 타일로 시공된 건물이 운용되고 있다.

2) 레이더 위상 대책용 전파흡수체

대형 선박의 경우 육지와 섬을 연결하는 교량이나 자체 금속구조물에 전파 반사에 따른 레이더의 허상이 선박의 조종에 큰 위험요소가 된다. 고무 Ferrite 전파흡수체 또는 도료형 전파흡수체를 교량이나 구조물에 시공하여 레이더의 해상력을 향상시키고 있다.

3) 전파무향실용 전파흡수체

최근 전파공해가 심각해짐에 따라 각종 EMI 검사나 측정에 전파무향실의 수요가 커지고 있다. 이 경우 광대역 흡수특성이 요구되므로 소결 페라이트 흡수체와 카본을 발포우레탄에 혼입시킨 다층 구조 또는 피라미드 형태의 흡수체가 사용된다.

4) 안테나의 지향성 개선용 전파흡수체

파라볼라 안테나의 주위에 전파흡수체를 도포하여 지향 특성을 개선한다.

5) 전자기기 누설 방지용 전파흡수체

전자레인지 등 고전력 전자파기기로 부터 누설되는 전자파는 인체에 나쁜 영향을 미친다. 가스켓 부위에 고무 전파흡수체를 부착하여 전파 누설을 방지한다.

VI. 결 론

전파흡수체의 동작원리 및 이를 이해하기 위한 전자파 이론, 전파흡수재료의 종류 및 고주파 손실 특성, 그리고 전파흡수체의 응용분야에 대해 간략히 서술하였다. 전파흡수체로서 요구되는 특성은 넓은 흡수 대역폭, 박형 및 경량화, 그리고 우수한 강도 및 내구성이다. 전파흡수재료에 대한 연구는 오래 전 부터 시작되어 일본의 TDK, NEC, 미국의 Plessey, Emerson & Cumming사 등 유수의 기업에서 다양한 상품이 생산되고 있으나 상기 특성을 개선하고자 하는 연구는 현재도 계속되고 있다.

전자 및 통신기기의 사용이 급증하면서 각종 EMI 대책용으로 전파흡수체의 수요는 계속 늘어날 전망이다. 특히 군사용도로 응용이 확대되면서 외국기업은 이 재료의 해외 유출을 통제하고 있고 사용된 흡수체를 각사의 최대 Know-how로 삼고 있다. 흡수 대역폭 향상과 박형화에 필요한 흡수체 설계기법 및 소재 개발, 신뢰도가 높은 전파흡수능 측정기술 확보에 꾸준한 연구가 필요하다고 본다.

참 고 문 헌

- [1] 石野健, 橋本康雄, “フェテイわ用いた電波遮蔽材料” エレクトロニク セテミクス, 88(9), 20-24 (1988).
- [2] H. Yamashita, N. One, Y. Hashimoto, K. Ishino, M. Inoue, K. Akita, “Electromagnetic Absorbing Wall for TV Ghost Suppression”, Trans. IECE Japan, E61(8), 729-736(1978).
- [3] 石野健, 三浦太郎, “電波暗室”, エレクトロニク セテミクス, 88(9), 64-71(1988).
- [4] M. B. Amin, J. R. James, “Techniques for Utilization of Hexagonal Ferrites in Radar Absorbers-Part 1 Broad Band Planar Coatinings”, Radio Electro. Eng., 51(5), 209-218 (1981).
- [5] 清水康敬, 西方敬博, 鉛木松一, “ゴム カarbon シトによるシ-ダ電波障害対策用吸収體” 電子通信學會 技術研究報告, EMCJ84(16), 1-8(1984).
- [6] M. T. Lanagan, J. H. Kim, D. C. Dube, S. J.

- Jang and R. E. Newnham, "A Microwave Dielectric Measurement Technique for High Permittivity Materials", in received manuscript.
- [7] Y. Naito and T. Mizumoto, "Effect of doping carbon in a electro-magnetic wave absorber, rubber ferrites", Trans. IECE Jap. J69-C258-261 (186).
- [8] 太田恵造, "磁氣工學の基礎I", 共立全書 (1973).
- [9] 太田恵造, 近角聰信, "フェテイの高周波損失", 金屬物理, 3(4), 129-140(1957).
- [10] G. T. Rado, R. W. Wright, and W. H. Emerson, "Ferromagnetism at Very High Frequencies. III Two Mechanisms of Dispersion in a Ferrite", Phys. Rev. 80(2), 273-280 (1950).
- [11] H. P. J. Wijn and J. Smit, Ferrites, Seikosha Printing Co. Ltd., Tokyo, Japan(1965).
- [12] J. L. Snoek, "Dispersion and Absorption in Magnetic Ferrites at Frequencies above one Megacycle", Physica, 14, 207-217(1984).
- [13] 内藤喜之, 末武國弘, 藤原英二, 佐藤正明, "ゴムフェイテイト 吸収櫛の電波吸収特性", 電子通信學會論文誌, 52-B(4), 242-247(1969).
- [14] S. S. Kim, et al, "Complex Permeability and Permittivity and Micro-wave Absorption of Ferrite-Rubber Composite in X-band Frequencies", IEEE Trans. Mag., 27, 5462-5464 (1991).
- [15] Y. Naito and K. Suetake, "Application of ferrite to electromagnetic wave absorber and its characteristics", IEEE Trans. MTT, 19, 65-72 (1991).
- [16] H. M. Musal, Jr., and H. T. Hahn, "Thin-layer electromagnetic absorber design", IEEE Trans. Mag. 25, 3851-3853(1989).