

전파무향실용 페라이트 흡수체의 설계 및 특성

(Design and Properties of Ferrite Absorber Used in Anechoic Chamber)

한 대 희* · 김 진 석** · 오 길 남** · 조 성 백*** · 김 성 수*

(D. H. Han* · J. S. Kim** · K. N. Oh** · S. B. Jo*** · S. S. Kim*)

요 약

전파무향실에 사용 적합한 평면 페라이트 전파흡수체의 설계 및 제조, 그리고 전파흡수특성에 관해 연구하였다. 임피던스 정합 방정식의 엄밀해를 이용하여 페라이트 흡수체의 복소투자율 범위에 관해 분석하였다. 페라이트 소결체의 복소투자율 및 복소유전율로부터 정합주파수 및 정합두께를 결정하고 실측한 반사감쇠특성과 비교하였다. 전파흡수특성과 재료정수와의 상관관계에 대한 분석결과에 의거하여 정합주파수 및 정합두께의 조절을 위한 재료정수의 제어 방안에 관해 검토하였다.

Abstract

Design and microwave absorbing properties of ferrite plate are investigated for the application to the radiowave absorbers used in anechoic chamber. The required frequency-dependence of complex permeability is determined on the basis of wave-impedance-matching relationship. The plate thickness and matching-frequency are determined from the complex permeability and dielectric constant, and then compared with the directly measured reflection loss. A systematic variation of material constants and their influence on the microwave absorbing properties are demonstrated.

I. 서 론

EMI(Electromagnetic Interference), EMC(Electromagnetic Compatibility)에 대한 정밀측정의 필요에 따라 전파무향실에 대한 수요는 계속 늘어날 전망이다. 전파무향실의 특성은 주로 그 안에 설치

된 전파흡수체에 의해 결정되어지고, 시공비의 대부분 또한 전파흡수체의 재료구입비가 차지한다. 이런 면에서 전파무향실용 흡수체에 대한 연구는 매우 중요한 의미를 갖는다.

전파무향실에 사용되는 흡수체로는 페라이트와 피라미드 형의 styroform 재료가 조합되어 사용되고

* 충북대학교 공과대학 재료공학과(Dept. of Materials Engineering, Chungbuk National University)

** 한국전자통신연구소(Electronics and Telecommunications Research Institute)

*** 국방과학연구소(Agency for Defence Development)

있다. 그러나 피라미드 흡수체는 1GHz 미만의 주파수 대역에서 성능이 떨어지기 때문에, 이에 대한 보완책으로 페라이트 흡수체가 사용된다.[1] 최근 전파무향실의 발전 추세가 광대화화, 유효공간의 극대화인 점을 감안할 때 흡수능이 우수하고 보다 박형인 페라이트 흡수체가 요구되고 있다.

본 논문에서는 30MHz~1GHz 주파수 대역에서 흡수능이 우수한 페라이트 흡수체의 제조를 목표로 페라이트의 자성 및 유전특성과 이를 이용한 흡수체 설계기술, 소재 가공기술, 그리고 전파흡수특성에 관한 연구 결과를 기술하였다. Naito[2], Musal 등 [3]이 제시한 임피던스 정합 근계적도를 보완하여 복소투자율의 범위를 예측하였고, 이러한 자기적 특성에 부합하는 페라이트를 선정하였다. 임피던스 정합 방정식의 엄밀해 및 근사해[4, 5]를 이용하여 정합주파수 및 정합두께에 관해 분석하였고, 이의 체계적 조절을 위한 투자율 및 유전율의 제어 방안에 관해 검토하였다.

II. 흡수체 설계

전파암실용 흡수체로 적합한 페라이트를 선정기 위해서는 먼저 흡수체의 복소투자율(μ_r) 및 복소유전율(ϵ_r)의 허용 범위에 관한 계산이 필요하다. 배면이 도체로 단락된 전파흡수체의 경우 무반사 조건은 다음 식을 만족하는 임피던스 정합이 이루어질 때 얻어질 수 있다.

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

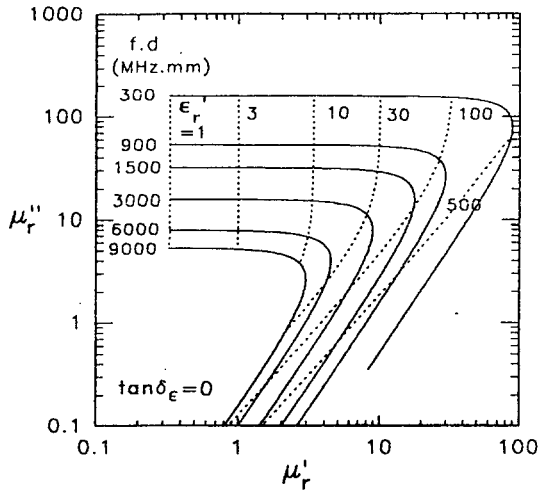
여기서 d 는 흡수체 두께, λ 는 전파의 파장이다. 전파암실용 페라이트 타일의 경우 사용 주파수 대역이 30MHz~1GHz이고, 흡수체 허용 두께가 10mm 수준이므로 $f \cdot d$ 가 300~10,000MHzmm범위에서 임피던스 정합근이 존재할 복소투자율(μ_r) 및 복소유전율(ϵ_r)의 허용 범위를 계산하였다.

페라이트 타일의 경우 유전상수 및 유전손실계수

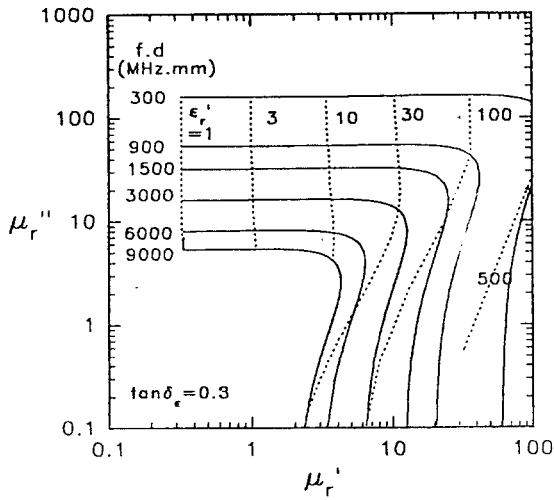
는 주파수에 따라 거의 일정한 것이 일반적인 특징이기 때문에, ϵ_r 및 $\tan \delta_e$ 는 일정하게 잡고 상기 $f \cdot d$ 범위에서 μ'_r 및 μ''_r 의 구역을 0.1~100으로 설정하였다. $\mu'_r - \mu''_r$ 직좌표 평면을 $N \times N$ 구역으로 나누고 각 점에서의 반사감쇠량을 계산하여 최대흡수점을 찾는 방식에 의해 $\mu'_r - \mu''_r$ 평면에 정합근 궤적을 도식화 하였다. 계산과정에서 정합조건의 판별은 반사감쇠량 -50dB를 기준으로 하였다.

[Fig. 1]은 $f \cdot d = 300 \sim 9,000$ MHz mm 범위에서 계산한 임피던스 정합근을 도식화한 것이다. 이와 유사한 임피던스 정합근 궤적도는 Naito[2], Musal과 Hahn[3] 등에 의해 이미 제시된 바 있다. 이 근계적도를 보면 임피던스 정합조건은 크게 2영역으로 나누어 살펴볼 수 있다. $\mu''_r > \mu'_r$ 인 구간에서 정합주파수와 정합두께의 곱($f_m \cdot d_m$)은 주로 μ''_r 에 의해 결정됨을 알 수 있다. 유전손실계수($\tan \delta_e$)가 증가하여도 이 영역에서의 임피던스 정합점은 변화하지 않음을 볼 수 있다. 이 구역에 임피던스 정합점이 존재할 때 주어진 주파수에서 흡수체 두께를 줄이기 위해서는 μ''_r 이 큰 재료의 선정이 무엇보다 중요하다. 반면 $\mu'_r > \mu''_r$ 인 경우에는 $f \cdot d = \text{constant}$ 인 궤적이 ϵ'_r 이 증가함에 따라 μ'_r 및 μ''_r 이 작아지는 구역으로 휘어짐을 볼 수 있다. 또한 이 구역에서 임피던스 정합점은 $\tan \delta_e$ 가 커질수록 μ'_r 이 큰 구역으로 이동함을 볼 수 있다. 즉 $\mu'_r > \mu''_r$ 인 경우에 임피던스 정합조건은 흡수체의 복소투자율 뿐만 아니라 유전손실계수에 의해서도 지배받는다.

일반적인 페라이트의 경우 유전상수(ϵ'_r)은 30을 넘지 않기 때문, [Fig. 1]의 근계적도를 참조하면 30MHz~1GHz 주파수 영역에서 사용 적합한 페라이트 타일을 제작하기 위해서는 $\mu''_r > \mu'_r$ 의 복소투자율 분산 특성을 갖는 재료의 선정이 중요하다. 흡수체 두께를 10mm로 잡았을 때 30MHz에서 임피던스 정합이 일어나기 위해서는 이 주파수에서 μ'_r 이 10 이하, μ''_r 이 적어도 200 가까이 되어야 함을 알 수 있다. 또한 1GHz 주파수 부근에서도 허용치 이하의 반사감쇠량을 갖기 위해서는 $\mu'_r \approx 3$, $\mu''_r \approx 3$ 정도의 값을 가져야 한다. 흡수체 두께를 5mm 정도로



(a)



(b)

[그림 1] 임피던스 정합 근계적도.

[Fig. 1] Impedance-matching solution maps for zero reflection: (a) $\tan \delta_e = 0$, (b) $\tan \delta_e = 0.3$.

낮추기 위해서는 동일 주파수에서 μ_r'' 이 2배 정도 증가하여야 한다.

[Fig. 1]의 $\mu_r'' > \mu_r'$ 의 구역에서 임피던스 정합 조

건이 성립하는 흡수체의 경우, 정합주파수와 정합두께는 Akita 등[5]이 제시한 임피던스 정합 방정식의 근사해에 따른 것이 예측된다. 식 (1)의 해는 $\mu_r'' > \mu_r'$, $\tan \delta_e \ll 1$ 의 조건 하에서 다음과 같이 간략히 표시된다.

$$d/\lambda = 1/2\pi\mu_r'' \tag{2a}$$

$$\epsilon_r' = 3\mu_r' \tag{2b}$$

흡수체 두께는 식 (2a)에 따르고 μ_r'' 이 커질수록 두께는 감소한다. 식 (2b)를 만족하는 주파수에서 임피던스 정합이 이루어지며 ϵ_r' 및 μ_r' 의 제어에 의해 정합주파수의 조절이 가능함을 보여준다. 이와같은 근사해는 [Fig. 1]의 임피던스 근계적도에서도 확인할 수 있다. $\mu_r'' > \mu_r'$ 구역에서 $f \cdot d$ 값은 μ_r'' 에 반비례하고, ϵ_r' 과 μ_r' 사이에는 식 (2b)의 관계가 성립하고 있다.

III. 재료선정 및 흡수체 제조

전파흡수체로 사용 가능한 페라이트 재료는 화학 조성에 따라 크게 3가지로 구분할 수 있다. Mn-Zn 페라이트, Ni-Zn 페라이트, Ba 페라이트(일명, 육방정 페라이트)가 그 3가지이다. Mn-Zn 페라이트는 투자율이 매우 높은 재료이나 자기공명이 1MHz 이하의 저주파 대역에서 일어나기 때문에 30MHz ~ 1GHz 주파수 대역에서는 복소투자율이 너무 작은 단점이 있다. 반면 Ba계 육방정 페라이트는 1GHz 근처의 고주파 대역에서 자기공명이 일어나기 때문에 본 연구의 관심 주파수 대역에서는 μ_r'' 이 너무 작은 문제점을 갖고 있다.[6] 따라서 본 연구에서 주 대상 재료로는 Ni-Zn 페라이트를 선정하였다. Ni-Zn 페라이트는 1~200MHz 범위 안에서 자기공명이 일어나기 때문에 앞서 설계한 재료 특성에 적합할 것이 예상되었다.[7]

본 연구에서 채택한 Ni-Zn 페라이트 타일의 제작은 통상적인 세라믹 제조공정에 의해 이루어졌다. 적정 구성비로 혼합된 분말을 내경 3mm, 외경 9mm 인 toroidal mold에 충전시킨 후 100MPa의 압력으로 가압하여 환상의 성형체를 제조하였다. 1,250℃

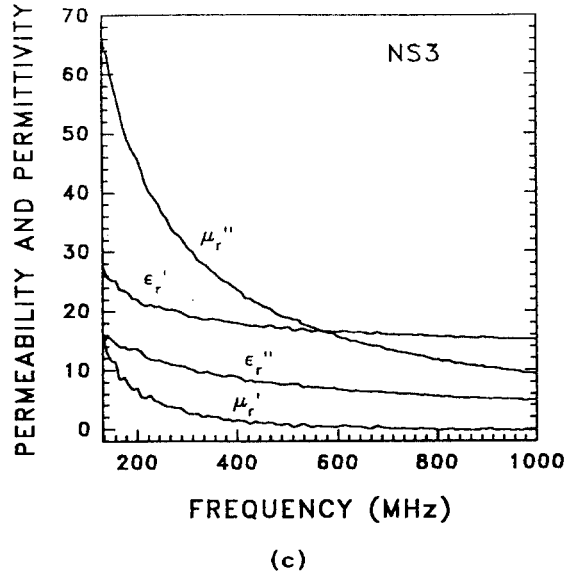
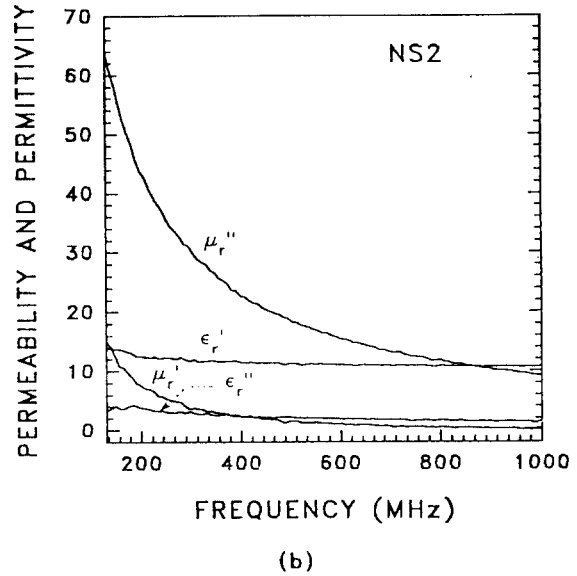
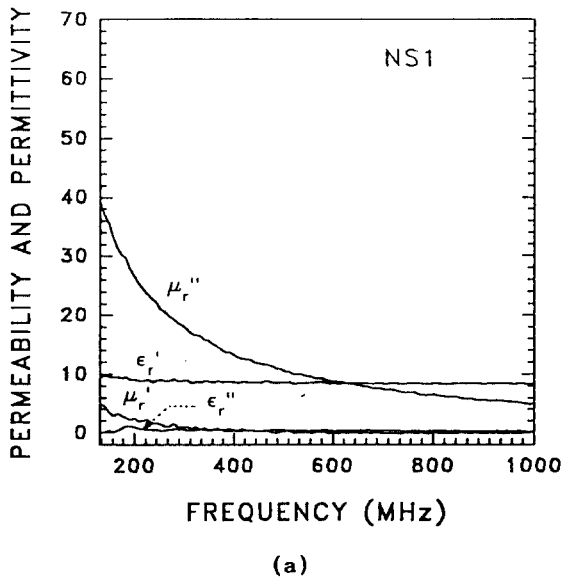
에서 소결한 시편을 APC-7 beadless airline 치구에 맞게 내경 3mm, 외경 7mm로 정밀 가공하였다.

페라이트의 복소투자율 및 복소유전율은 HP 8720B network analyzer를 이용하여 투과/반사법에 의해 측정하였다. 측정 주파수 대역은 130MHz~1GHz이었다. 반사감쇠량의 실측은 흡수체 배면을 금속으로 단락시킨 후 반사 산란계수를 측정하는 방식에 의해 이루어졌다.

IV. 전파흡수특성

[Fig. 2]는 3가지 종류(NS1, NS2, NS3)의 페라이트에서 얻어진 μ_r 및 ϵ_r 의 주파수 분산 특성이다. 3가지 시편 모두 복소투자율은 주파수 증가에 따라 감소하는 특성을 보이고 있다. 또한 전 주파수 영역에서 $\mu_r'' > \mu_r'$ 의 관계가 성립하고 있기 때문에 이 3가지 시편 모두 앞서 계산한 흡수체 설계 조건에 모두 부합함을 알 수 있다. 반면 복소유전율의 실수(ϵ_r') 및 허수(ϵ_r'')는 모두 주파수에 따라 일정한 분산 특성을 보이고 있다.

NS1과 NS2 시편의 차이점은 복소투자율의 크기이다. ϵ_r' 은 12정도로 거의 차이가 없는 반면, μ_r' 및

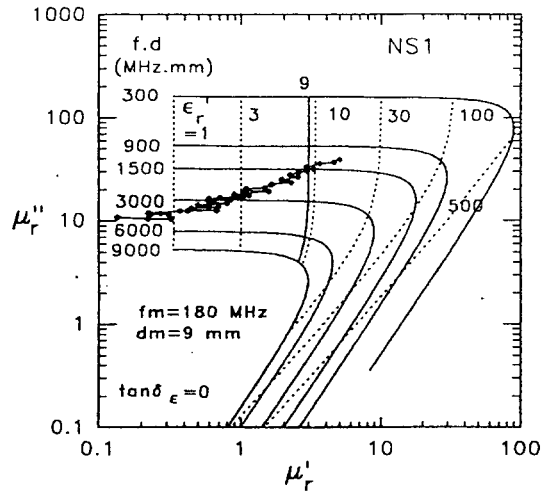


[그림 2] 페라이트 시편의 복소투자율 및 복소유전율

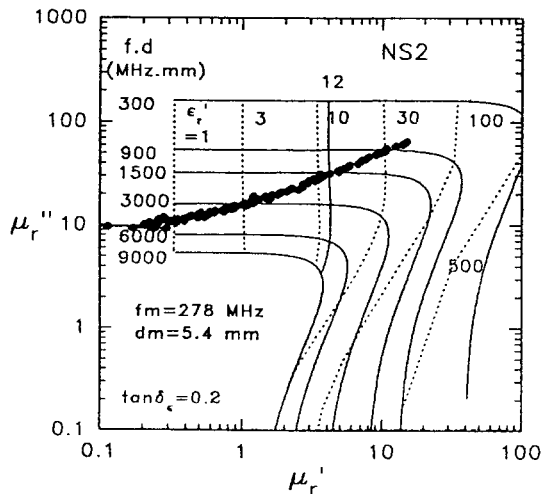
[Fig. 2] Complex permeability and permittivity measured in ferrite specimens: (a) NS1, (b) NS2, (c) NS3.

μ'' 은 NS2 시편에서 약 1.5배 정도 큰 값을 보이고 있다. NS3 시편의 특징은 복소유전율이 크다는 점이다. NS3 시편의 경우 복소투자율은 NS2 시편과 거의 차이가 없는 반면 ϵ_r' 은 2배 정도, ϵ_r'' 은 3배 정도 큰 값을 보이고 있다.

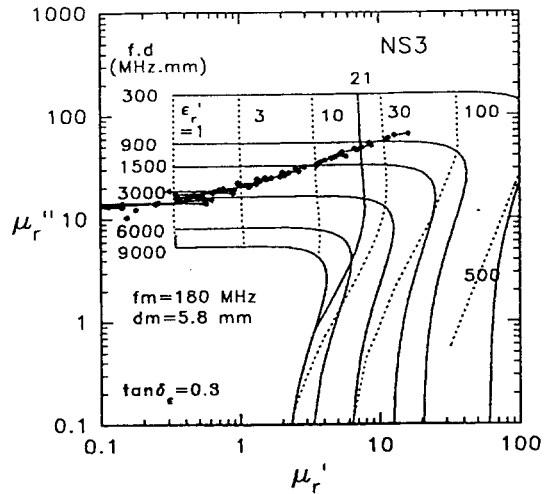
[Fig. 3]은 임피던스 정합 방정식의 엄밀해를 이용하여 상기 3가지 시편에서 구한 정합주파수(f_m) 및 정합두께(d_m)를 나타낸 것이다. 임피던스 정합



(a)



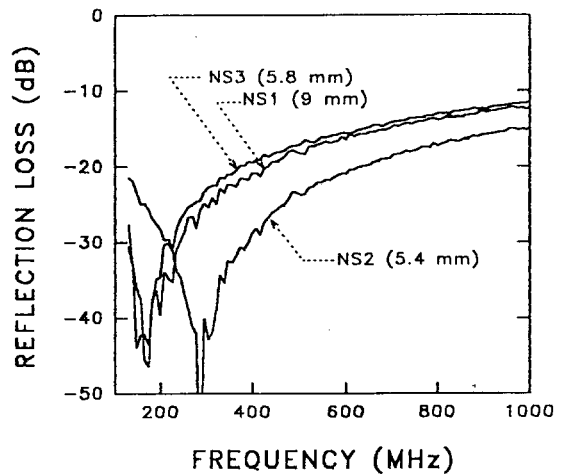
(b)



(c)

[그림 3] 페라이트 흡수체의 정합주파수 및 정합 두께의 결정

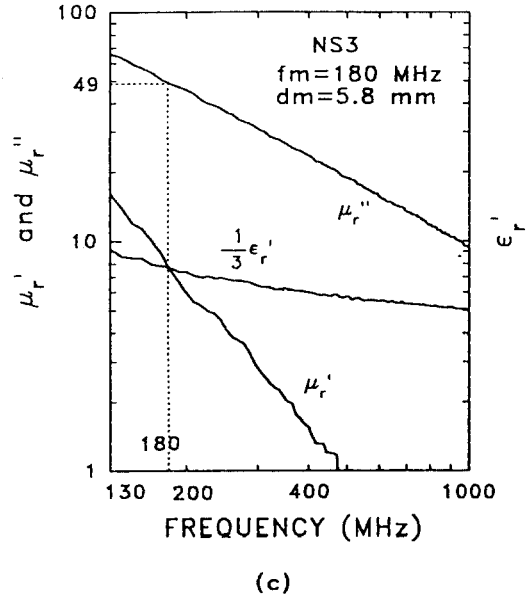
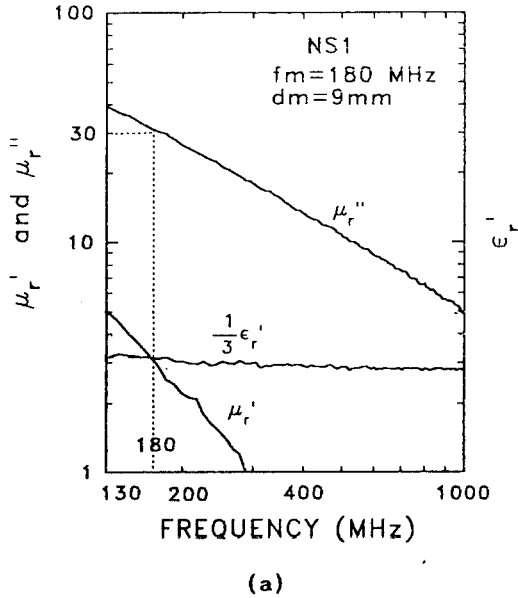
[Fig. 3] Impedance-matching point determined in ferrite specimens: (a) NS1, (b) NS2, (c) NS3.



[그림 4] 페라이트 흡수체의 반사감쇠량

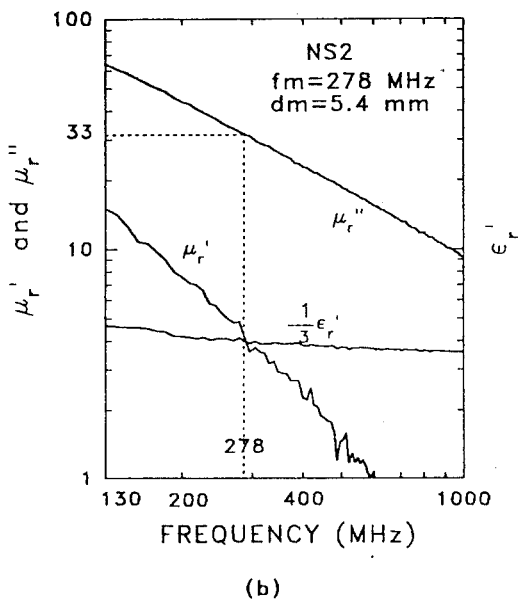
[Fig. 4] Microwave absorbing properties of ferrite specimens.

근세적으로도 μ_r' 및 μ_r'' 의 주파수 분산치를 도식화하고 $\epsilon_r' = \text{constant}$ 인 선과 만나는 점에서의 주파수와 $f \cdot d$ 값을 읽으면 정합주파수와 정합두께를 구할 수 있다. 이러한 방법에 의해 구한 f_m 과 d_m 을 각 그림의 좌측 하단에 나타내었다. 3종류 시편 모두 f_m 은 30MHz~1GHz 주파수 범위 안에 있으나 f_m 과 d_m 은



[그림 5] 근사해를 이용한 정합주파수 및 정합두께의 결정

[Fig. 5] Prediction of matching-frequency and matching-thickness using the approximated solution of impedance-matching: (a) NS1, (b) NS2, (c) NS3.



각 시편의 재료정수의 차이에 따라 크게 변화함을 알 수 있다.

[Fig. 4]는 상기 페라이트 흡수체의 반사감쇠량 결과이다. 각 시편에서 최대전파흡수가 일어나는 주파수와 흡수체 두께는 앞서 계산한 정합주파수 및 정합두께와 잘 일치하고 있다. NS1과 NS3 시편의 경우 정합주파수는 180MHz 부근으로 거의 동일하고 전파흡수특성도 거의 비슷하나, NS3 흡수체의 두께가 상당히 박형($d_m=5.8\text{mm}$)임을 알 수 있다.

[Fig. 5]는 임피던스 정합방정식의 근사해를 이용하여 정합주파수 및 정합두께를 구한 결과를 나타낸 것이다. 식 (2b)의 관계가 성립하는 주파수로부터 구한 f_m 과 그 주파수에서의 μ_r'' 으로부터 계산한 d_m 을 그림 우측 상단에 표시하였다. 이 계산치는 엄밀해를 이용하여 구한 [Fig. 3]의 결과와 잘 일치하고

있다. 자기손실이 큰($\mu_r'' > \mu_r'$) 페라이트 흡수체의 경우 근사해를 이용하여 구한 정합주파수와 정합두께가 매우 정확함을 알 수 있다.

[Fig. 5]의 근사해로부터 정합주파수 및 정합두께와 재료정수와의 상관관계에 대한 보다 정량적인 해석이 가능하다. ϵ_r' 이 일정한 상태에서 μ_r' 이 커지면 ([Fig. 5] (a) 및 [Fig. 5] (b)의 비교) 임피던스 정합은 보다 고주파 대역에서 일어난다(NS1 시편의 경우 $f_m = 180\text{MHz}$, NS2 시편의 경우 $f_m = 278\text{MHz}$). 정합주파수에서의 μ_r'' 값이 30 정도로 거의 같기 때문에 NS2 시편에서 d_m 이 감소하는 것은 전파의 파장이 감소하기 때문이다.

μ_r' 이 일정한 상태에서 ϵ_r' 이 커지면 ([Fig. 5] (b) 및 [Fig. 5] (c)의 비교) f_m 은 저주파 대역으로 이동한다(NS3 시편의 경우 $f_m = 180\text{MHz}$). 또한 NS3 시편의 두께($d_m = 5.8\text{mm}$)가 NS1 시편($d_m = 9\text{mm}$)에 비해 현저히 감소한 것은 NS3 시편의 μ_r'' 이 매우 크기 때문이다. 정합주파수의 조절은 μ_r' 과 ϵ_r' 의 제어에 의해 가능하고, 박형의 흡수체는 μ_r'' 이 큰 재료에서 얻을 수 있음을 이상의 실험결과로부터 확인할 수 있다.

V. 결 론

전파무향실에 사용 적합한 평면 페라이트 전파흡수체의 설계, 재료 선정 및 제작, 전파흡수능 평가 분석에 관한 연구결과를 기술하였다. 임피던스 정합 방정식의 엄밀해를 도식화하여 30MHz~1GHz 주파수 대역에서 정합주파수가 존재할 흡수체의 복소투자율의 범위를 예측하였다. $\mu_r'' > \mu_r'$ 의 조건을 만족하며 주파수 증가에 따라 μ_r' 및 μ_r'' 모두 감소하는 분산 스펙트럼이 요구되었다. 이러한 특성을 갖는 재료로 Ni-Zn 페라이트를 선정하였으며, 화학 조성 및 제조조건을 달리하여 복소투자율 및 복소유전율이 각각 다른 3종류의 시편을 제조하였다. 3시편 모두 30MHz~1GHz 주파수 대역에서 전파흡수특성이 우수하였으나, 정합주파수 및 정합두께는 페라이트의 재료정수에 따라 현격한 차이를 보였다. 정

합주파수는 페라이트의 μ_r' 및 ϵ_r' 에 의해 조절되었다. ϵ_r' 이 일정한 상태에서 μ_r' 이 클수록 정합주파수는 고주파 대역으로 이동하였고, μ_r' 이 일정한 상태에서 ϵ_r' 이 커지면 정합주파수는 저주파 대역으로 이동하였다. 또한 흡수체의 두께는 정합주파수에서의 μ_r'' 이 클수록 감소하였다. 이와같은 실험결과는 임피던스 정합 방정식의 근사해로 정량적인 해석이 가능하였다. μ_r' 및 ϵ_r' 의 적절한 조합과 μ_r'' 이 큰 페라이트의 선정에 의해 전파무향실에 적합한 전파흡수체의 제작이 가능하였다.

참 고 문 헌

- [1] "TDK EMI Prevention Components, Radiowave Absorbers and Anechoic Chamber," TDK 기술자료.
- [2] Y. Naito and K. Suetake, "Application of Ferrite to Electromagnetic Wave Absorber and Its Characteristics," IEEE Trans. MTT, vol. 19, pp.65~72, 1971.
- [3] H. M. Musal, Jr. and D. C. Smith, "Universal Design Chart for Specular Absorber," paper presented at the International Magnetics Conference, April, 1990, United Kingdom.
- [4] H. M. Musal, Jr., and H. T. Hahn, "Thin-layer Electromagnetic Absorber Design," IEEE Trans. on Mag., vol.25, pp.3851~3853, 1989.
- [5] K. Akita, "Countermeasures against TV Ghost Interference Using Ferrite," in FERRITES: Proceedings of the International Conference, Japan, September, 1980, pp.885~889.
- [6] H. P. J. Wijn and J. Smit, Ferrites, Seikosha Printing Co. Ltd., Tokyo, Japan(1965).
- [7] H. P. J. Wijn, M. Gevers and C. M. van der Burgt, "Note on the High Frequency Dispersion in Nickel Zinc Ferrites," Rev. Mod. Phys., vol.25, pp.91~92, 1953.