

니켈-아연 페라이트복합재의 자기적특성과 전파흡수특성

조성백·오재희

인하대학교 무기재료공학과

(1993년 3월 29일 받음, 1993년 6월 10일 최종 수정본 받음)

화학양론적 조성을 갖는 Ni-Zn ferrite에서 Ni/Zn 비의 변화에 따른 전파흡수체의 성능평가 지수, 정합주파수 및 정합두께와 자기적인 변수와의 상관관계를 조사하였다. Ni/Zn 비가 감소할수록 μ_r 의 최대치는 저주파수 영역으로 이동하며 Ni/Zn 비가 1.0인 경우 μ_r 의 값은 다른 조성에 비해 높은 값을 가짐을 확인할 수 있었다.

Ni/Zn ferrite 복합재는 1-12 GHz 영역에서 2개의 정합주파수 (f_{m1} , f_{m2}) 및 정합두께 (d_{m1} , d_{m2})가 존재하며 f_{m1} 은 f_r (공명주파수)과 비례하며 f_{m2} 는 포화자화값에 비례함을 확인하였다.

I. 서 론

페라이트 전파흡수체는 스핀의 운동이 외부자장의 변화를 따라가지 못하여 생기는 자성손실을 이용한 것으로 소결페라이트나 페라이트를 고무, 플라스틱등 비자성재료와 혼합한 페라이트 복합재로 사용한다. 페라이트 조성에 따라 차이는 있으나 소결페라이트는 수십 kHz~수백 MHz 부근에서, 고무에 혼합한 페라이트 복합재는 1 GHz 이상의 마이크로파 영역에서 전파흡수체로 널리 사용되고 있다.

페라이트 복합재는 페라이트 화학조성, 페라이트 분말과 비자성재료와의 혼합비, 페라이트 입자경에 의해 전자기적 특성을 제어 할 수 있으며 이에 관한 연구는 많이 행해져 왔다[1-3].

전파흡수체의 성능을 평가하는 평가지수는 정합주파수, 정합두께, 비대역폭등이 있으며 이러한 평가지수는 전자기적 특성(복소비투자율, 복소비유전율)과 밀접한 관계가 있어 우수한 전파흡수체를 개발하기 위해서는 전자기적 특성과 전파흡수 특성과의 상관관계에 대한 이해가 선행되어야 한다.

페라이트를 이용한 흡수체의 정합주파수(f_m)는 임피던스 정합조건을 만족하는 주파수를 말하며 그 주파수에서 정합조건을 만족하는 두께를 정합두께(d_m)라한다. 정합주파수와 정합두께는 상호의존적 관계를 가지고 있다. 소결 페라이트나 페라이트 복합재 모두 2개의 정합주파수 f_{m1} ,

f_{m2} ($f_{m1} < f_{m2}$)와 정합두께 d_{m1} , d_{m2} 가 있으며 정합주파수는 수십 MHz에서 수십 GHz까지 다양한 값을 가지고 있다[4].

실용적인 측면에서 사용주파수 및 요구되는 두께가 정해졌을때 이를 만족하는 재료를 선정하고 제조하는 것은 용이하지 않다. 따라서 이러한 문제를 해결하는 방법으로 전파흡수특성과 페라이트 분말의 고유한 특성인 자기적인 변수와의 상관관계를 고찰하는 것은 전파흡수체의 응용면에서 확립해야 할 부분이다. 따라서 본 연구에서는 전파흡수체의 응용면에서 많이 사용되는 Ni-Zn ferrite복합재 시편을 제조하여 Ni/Zn 비에 따른 전자기적 특성과 전파흡수 특성간의 상관관계를 고찰하였다.

화학양론적 조성을 갖는 Ni-Zn ferrite system에서 Ni/Zn비를 변화시키면서 페라이트 분말을 제조한 후 비자성체인 실리콘 고무와 혼합하여 페라이트 복합재를 제조한 후 1-12 GHz 영역에서 복소비투자율, 복소비유전율의 주파수 의존성을 고찰하였다. 또한 Ni-Zn ferrite복합재 시편의 정합주파수, 정합두께와 자기적인 변수와의 상관관계 및 조절방안을 조사하였다.

II. 실험방법

고상법을 이용하여 $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ ($x=0.4, 0.5, 0.6, 0.8, 1$) 조성을 갖는 Ni-Zn ferrite 분말을 제조하였다. Ferrite분말 합성에 사용된 출발원료는 시약급의

$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, NiO, ZnO이다. 출발원료를 원하는 화학양론적 조성으로 칭량한 후 에틸알코올을 매개체로 볼밀에서 10시간 혼합하였다. 혼합 후 110 °C에서 24시간 건조한 다음 공기분위기 하에서 4 °C/min의 승온속도로 가열하여 1300 °C에서 2시간 동안 소성한 후 10 °C/min로 냉각시켰다. 합성된 Ferrite 분말을 Silicone 고무와의 무게비 (F/R=ferrite /rubber)를 4로 혼합하여 내경 3 mm, 외경 7mm의 toroidal mold에 넣고 상온에서 숙성시킨 후 탈형하여 ferrite 복합재 시편을 제조하였다. 합성한 ferrite 분말의 결정상은 X-선 회절분석기 (JOEL사)로 확인하였다. 또한 ferrite 분말의 포화자화는 VSM (Vibrating Sample Magnetometer)으로 측정하였다.

복합재 시편의 재료정수(복소비투자율, 복소비유전율)는 HP 8720B Network Analyser와 Co-axial type의 7 mm air line을 이용하여 1-12 GHz의 범위에서 측정하였다. 투과-반사법으로 구형도파관에 삽입된 시편의 반사산란계수(S_{11})와 투과산란계수(S_{21})을 측정하고 이 값으로부터 재료정수를 계산하였다.

III. 결과 및 고찰

X-선회절분석 결과 $\text{Ni}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ 의 모든 조성은 스피넬 단일상 임을 확인하였으며 Fig. 1에서 보여주듯이 격자정수 a는 Zn의 농도가 증가 할 수록 직선적으로 증가 하며 이들의 값들은 문헌상의 값과 매우 잘 일치함을 알 수 있다[5].

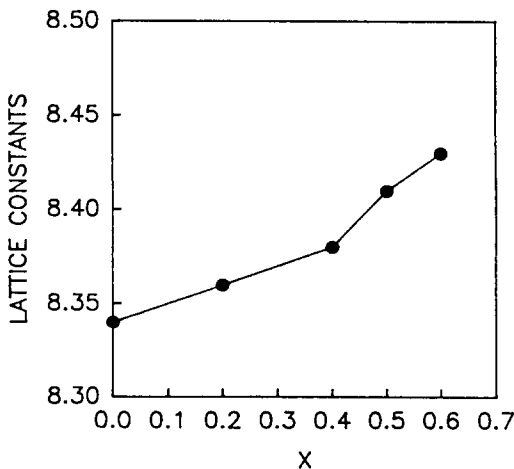


Fig. 1. Variation of lattice constants as a function of x in $\text{Ni}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$.

고주파수 영역에서 페라이트의 자화과정은 스핀의 회전자화와 자벽이동이 있다. 다결정 페라이트의 경우 이 두가지의 자화기구가 혼재한 형태로 공명현상이 관측되어진다. 각 자화기구에서 자기공명 주파수(f_r)와 포화자화(M_s)의 관계를 아래식으로 나타낼 수 있다[6].

$$\text{회전자화} : f_r(\mu_r - 1) = \gamma M_s \quad (1)$$

$$\text{자벽이동} : f_r(\mu_r - 1) = \gamma M_s^2 / \beta L \quad (2)$$

여기서 γ : gyrofactor, β : 제동인자, L : 자구의 폭이다.

(1), (2)식에서 알 수 있듯이 복소비투자율(μ_r)의 주파수 특성에 영향을 미치는 자기공명주파수가 포화자화와 밀접한 관계가 있으므로 페라이트 재료측면에서 보면 포화자화는 중요한 인자이다.

페라이트 복합재 시편의 제조시 사용한 실리콘 고무의 주파수에 따른 재료정수 변화는 1-12 GHz 주파수 영역에서 $\mu_r' = 1.0$, $\mu_r'' = 0$, $\epsilon_r' = 2.7$, $\epsilon_r'' = 0$ 의 일정한 값을 가지고 있다. 따라서 페라이트 복합재에서 전파흡수특성에 영향을 미치는 것은 페라이트의 재료정수이며 손실의 대부분은 자성손실이다[7].

Fig. 2는 1-12 GHz 주파수 영역에서 페라이트 복합재 (F/R=4)의 재료정수를 나타내었다. 투자율의 실수(μ_r')는 주파수가 증가함에 따라 감소 하다가 6 GHz 이상에서는 거의 일정한 값을 가지고 있다. 투자율의 허수(μ_r'')는 Ni/Zn비가 증가함에 따라 μ_r'' 이 급격히 감소하기 시작하는 주파수가 높은 주파수 영역으로 이동하며 모든 조성에서 주파수 증가에 따라 기울기는 급격 하였다. 이러한 경향은 다결정체 Ni-Zn ferrite의 연구결과와 일치한다[8].

복소비유전율의 실수부(ϵ_r')는 페라이트 조성변화에 따라 전 주파수 영역에서 5.7-6.4의 일정한 값을 보이고 있다. 일반적으로 페라이트 소결체 및 페라이트 복합재에서 ϵ_r' 은 100 MHz 이상의 주파수 영역에서 일정한 값을 가지는 것은 산소이온의 쌍극자 모멘트 영향이라 추측된다. 손실항인 ϵ_r'' 도 전 주파수 영역에서 0.1 정도의 매우 적은 값을 가진다. 따라서 전파흡수특성에 영향을 미치는 것은 페라이트의 재료정수이며 손실의 대부분은 자성손실을 확인 할 수 있다.

특정주파수에서 성분에 따른 μ_r'' 의 경향을 Fig. 3에 나타내었다. 저주파수 영역(6 GHz이하)에서는 x의 변화에 따라 μ_r'' 최대값은 변화하며 x=0.5인 경우 가장 큰 값을 가진다. 반면에 고주파수 영역(6 GHz 이상)에서는 μ_r'' 최대값은 거의 일정함을 보인다.

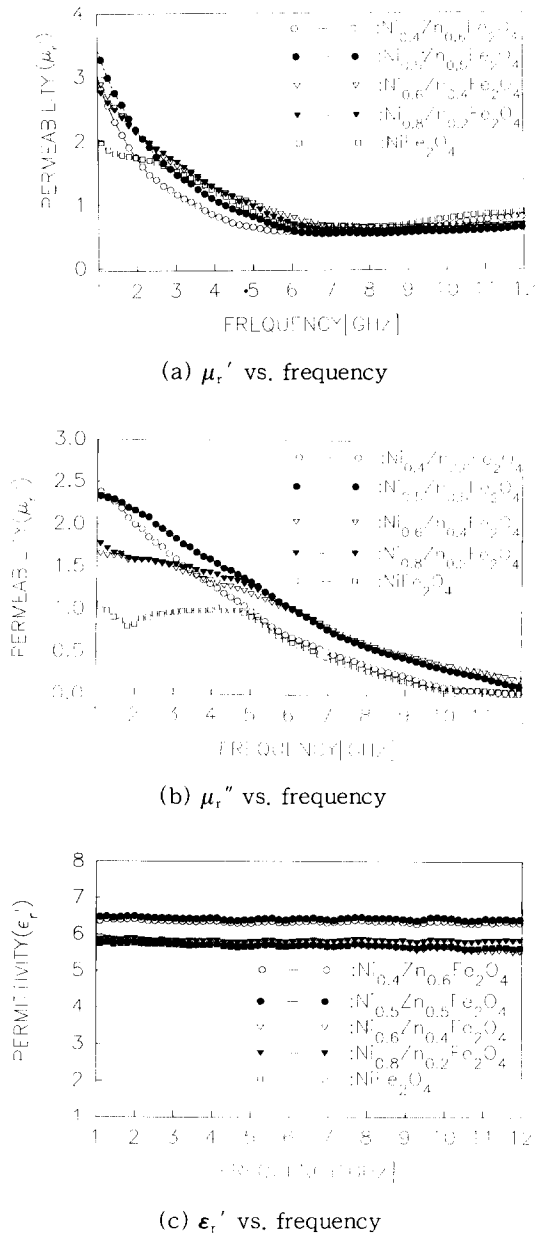


Fig. 2. Material constants(μ_r , ϵ_r) vs frequency of Ni-Zn ferrite composites.

H. T. Hahn 등[9]에 의한 Ni-Zn ferrite 소결체의 자기손실에 관한 연구에 의하면 스피넬구조(AB_2O_4)를 가지는 Ni-Zn ferrite에서 Ni/Zn비가 2.5에서 1.1까지 감소할때 투자율의 증가는 명백하게 μ_r'' 증가에 의해 수반

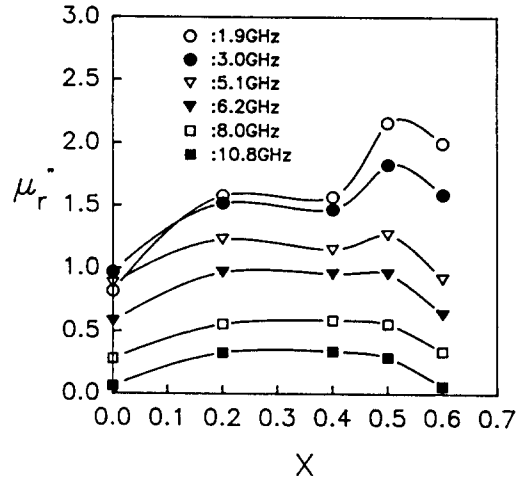


Fig. 3. μ_r'' as a function of frequency of $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ composites.

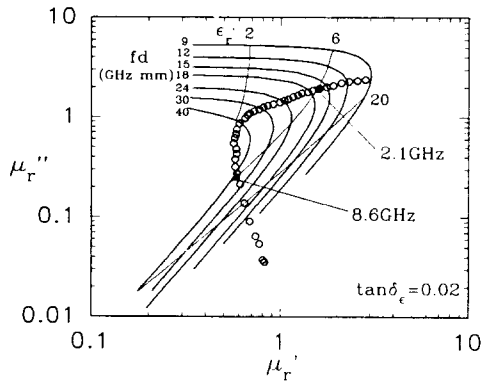
된다고 한다. 이 이후(Ni/Zn=1.1)에는 B-B반평행 스피넬구조작용이 우세하여 투자율의 감소가 시작된다. 그러나 실험에서 얻어진 결과에서 μ_r'' 은 Ni/Zn=1.0 근처까지 증가한다고 하였다. 이와같은 결과는 본 연구의 실험 결과에서도 동일하게 나타났다.

페라이트를 이용한 전파흡수체는 뒷면에 금속판을 부착 시킨 구조이며 이 경우 흡수체 표면에서의 규격화 입력 임피던스(Z_m)은 식(3)으로 나타내어진다.

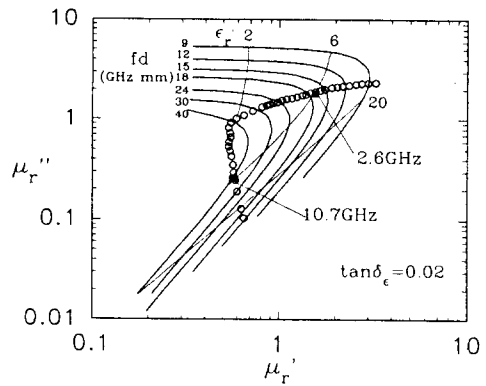
$$Z_m = \sqrt{\mu_r' / \epsilon_r'} \tanh [j(2\pi/\lambda) \sqrt{\mu_r' \epsilon_r'} d] \quad (3)$$

여기서 μ_r 은 복소비투자율($\mu_r' - j\epsilon_r''$), ϵ_r 은 복소비유전율($\epsilon_r' - j\epsilon_r''$), λ 는 자유공간에서의 마이크로파의 파장이며 d는 흡수체의 두께이다. $Z_m=1$ 일때 이 경우 정합조건(무반사조건)을 만족시켰다고 한다.

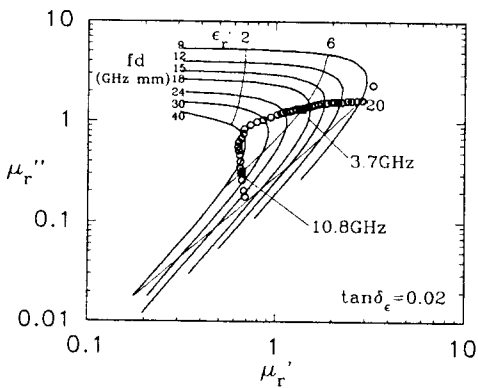
식(3)의 결과와 같이 재료정수는 전파흡수 특성과 밀접한 상관관계가 있으며 전파흡수 특성을 정량적으로 고찰하기 위해서는 식(3)에서 정합조건을 해를 구하여 도식화(임피던스 정합 근 제적도) 하는 방법이 사용되고 있다[10, 11]. 임피던스 정합 근 제적도에서 ϵ_r' 선과 $\mu_r' - \mu_r''$ 제적이 만나는 점이 임피던스 정합조건을 만족하는 점이며 이 점에서의 주파수를 정합주파수, 두께를 정합두께라 한다. 임피던스 근 제적도는 유전손실계수($\tan\delta_e$) 값의 변화에 따라 f d 제적이 많이 변화하나[11] 본 실험에 사용된 Ni-Zn ferrite 복합체는 $\tan\delta_e$ 값이 모두 0.02로 동일한 값을 가지므로 $\tan\delta_e=0.02$ 인 근 제적도를 이용하였다.



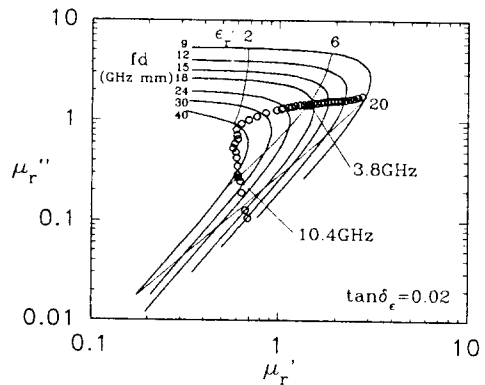
(a) $\text{Ni}_{0.4}\text{Zn}_{0.6}\text{Fe}_2\text{O}_4$



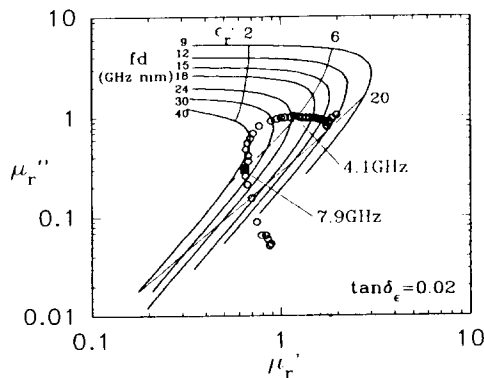
(b) $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$



(c) $\text{Ni}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_2\text{O}_4$



(d) $\text{Ni}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4$



(e) NiFe_2O_4

Fig. 4. Impedance matching solution map for zero reflection of Ni-Zn ferrite composites.

Fig. 4는 Fig. 2에서 나타난 재료정수 값을 식(3)에 대입하여 해를 구한 다음 임피던스 정합 근 제적도에 나타난 것이다. 일 예로 Fig. 4(a)에서 $\mu_r' - \mu_r''$ 제적과 ϵ_r' = 6.38선과의 교차점에서의 주파수(2.1, 8.6 GHz)와 이때의 fd값(15.54, 36.12 GHz·mm)으로 부터 Ni_{0.4}Zn_{0.6}Fe₂O₄복합체의 정합주파수는 2.1 GHz(f_{m1}), 8.6 GHz(f_{m2})와 정합두께 7.5mm(d_{m1}), 4.2mm(d_{m2})임을 알 수 있다. 따라서 본 실험에 사용된 5종의 Ni-Zn ferrite 복합체는 모두 두개의 정합점이 보이므로 두개의 정합주파수 f_{m1} , f_{m2} ($f_{m1} < f_{m2}$) 및 정합두께 d_{m1} , d_{m2} 가 있음을 알 수 있다.

f_{m1} 은 Ni/Zn비가 증가 할 수록 비례적으로 증가하는 경향을 보이나 f_{m2} 는 Ni/Zn비의 변화에 무관하다. 일반적으로 Ni_xZn_{1-x}Fe₂O₄에서 x의 변화에 따른 투자율의 주파수 특성은 x가 증가할 수록 초투자율은 작아지고 공명주파수는 높아진다고 하였다[8]. 즉 f_{m1} 은 Ni/Zn비와 비례적인 관계가 성립하므로 Ni/Zn비의 변화는 f_{m1} 의 조절방안으로 사용 가능한 것으로 판단되며 f_{m1} 은 공명주파수와 동일하게 초투자율에 반비례 함을 예상할 수 있다.

Table. 1은 Fig. 4의 정합두께와 정합주파수 값들을 정리하여 나타내었다. Table. 1에서도 알 수 있듯이 Ni/Zn비가 변화 함에따라 $f_{m1} \times d_{m1}$ 은 15.08 [GHz mm]에서 22.96 [GHz mm]로 변화 하는데 이러한 현상은 Ni/Zn비 변화에 따라 공명주파수 차이가 현저하기 때문에 일어나는 것으로 판단되어 진다.

Table. 1. Relationship between f_m and d_m in ferrite composites.

composition	f_{m1}	d_{m1}	$f_{m1} \times d_{m1}$	f_{m2}	d_{m2}	$f_{m2} \times d_{m2}$
Ni _{0.4} Zn _{0.6} Fe ₂ O ₄	2.1	7.5	15.54	8.6	4.2	36.12
Ni _{0.5} Zn _{0.5} Fe ₂ O ₄	2.6	5.8	15.08	10.7	3.4	36.38
Ni _{0.6} Zn _{0.4} Fe ₂ O ₄	3.7	5.3	19.91	10.8	3.4	36.72
Ni _{0.8} Zn _{0.2} Fe ₂ O ₄	3.8	5.2	19.76	10.4	3.7	38.48
NiFe ₂ O ₄	4.1	5.6	22.96	7.9	5.8	36.34

그러나 $f_{m2} \times d_{m2}$ 는 5종의 Ni-Zn ferrite 복합체 모두 36 [GHz mm]로 거의 일정한 값을 가진다. 이러한 현상은 ferrite조성마다 가지고 있는 고유특성 이라 사료된다. 본 실험에 사용된 Ni-Zn ferrite 복합체시편에서 f_{m1} 은 5 GHz 미만이며 f_{m2} 는 8 GHz 이상 이므로 Ni/Zn비를 변화함에 따라 적절한 f_{m1} 과 f_{m2} 를 선택 할 수 있다. 따라서 Ni/Zn비의 변화에 의하여 Ni-Zn ferrite 복합체의 정합주파수를 적절히 제어 할 수 있다고 판단된다.

Fig. 5는 포화자화 값과 정합주파수와 정합두께의 상관관계를 나타내었다. 포화자화값은 f_{m1} 에는 영향을 미치지 않으며 포화자화 값이 46.8 emu/g에서 77.3 emu

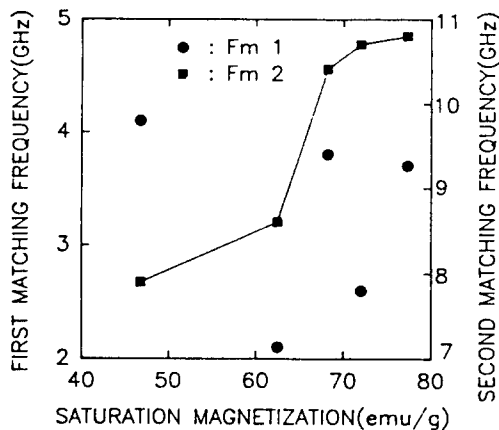


Fig. 5. Reflection between saturation magnetization and matchg frequency for Ni-Zn ferrite composites.

/g로 증가 함에따라 f_{m2} 는 7.9 GHz에서 10.8 GHz로 증가 함을 보인다. 즉 포화자화값과 f_{m2} 는 비례적인 관계가 성립하며 $f_{m2} \times d_{m2}$ 가 36 [GHz mm]로 거의 일정한 값을 가지므로 포화자화 값이 증가 함에따라 d_{m2} 즉 전파흡수체의 두께를 감소 시키는 것이 가능함을 알 수 있다.

IV. 결 론

Ni-Zn ferrite 복합체에서 자기적인 변수와 전파흡수체의 성능평가 지수인 정합주파수, 정합두께와의 상관관계를 조사하였다. 본 연구의 결과 다음의 세가지 뚜렷한 현상이 관찰되었다.

1. 복합체에서 Ni/Zn비의 변화는 제1정합주파수(f_{m1})와 비례적인 관계가 성립함을 알 수 있었다.
2. Ni/Zn비가 감소 할 수록 μ_r'' 의 최대치는 GHz 영역에서 저주파수 영역으로 이동하며 Ni/Zn 비가 1.0인 경우 μ_r'' 의 값은 다른 조성에 비해 높은값을 가졌다.
3. Ni-Zn ferrite 복합체에서 ferrite 분말의 포화자화는 제2정합주파수의 조절 방안으로 사용 가능함을 제시할 수 있었다.

참고문헌

[1] 柳田博明, 増報ニューセラミックスの發展, 化學工業社, pp85-115(1981).

- [2] 石野建, 市原謙一, セラミックス, **14**(3), 202 (1979).
- [3] 内藤喜之, 末武國弘, 藤原英二, 佐藤正明, 電子通信學會論文誌, **52-B**(1), 26(1969).
- [4] Y. Naito and K. Suetake, IEEE Trans on. MTT, **MTT-19**(1), 65(1971).
- [5] H. P. J. Wijn and J. Smit, Ferrites, Phillips Tech. Lib. pp 144-145(1950).
- [6] 橋本強雄, 市原謙一, 石野建, 清水康敬, 電子通信學會論文誌, **73-BII**, 214(1990).
- [7] 조성백, 권경일, 최경구, 김성수, 김재묵, 요업학회지, **29**(3), 177(1992).
- [8] H. P. J. Wijn and J. Smit, Ferrites, Phillips Tech. Lib. pp 269-283(1950).
- [9] H. T. Hahn, R. W. Cahill and H. M. Musal, Jr., J. Appl. Phys, **64**(10), 5650(1988).
- [10] H. M. Musal, Jr. and H. T. Hahn, IEEE Trans. Magn., **MAG-25**(5), 3851(1989).
- [11] S. S. Kim, S. B. Cho, K. I. Kwon, K. K. Choi, J. M. Kim and K. S. Churn, IEEE Trans. Magn., **MAG-27**(6), 5462(1991).

The Magnetic and Microwave Absorbing Characteristics of Ni-Zn Ferrite Composites

S. B. Cho and J. H. Oh

Department of Ceramic Engineering, Inha University

(Received 29 March 1993, in final form 10 June 1993)

The relationship between magnetic parameter and microwave absorbing performance evaluation factor of electromagnetic wave absorber such as matching frequency, matching thickness were investigated for Ni-Zn ferrite composites. It was identified that the maximum value of μ_i'' is shift to low frequency with decrease Ni/Zn ratio and the value of μ_i'' is maximum in the case of Ni/Zn=1. All Ni-Zn ferrite composites in this study have two matching frequencies in 1-12 GHz frequency. It can be suggested that f_{m1} is proportional to resonance frequency and f_{m2} is proportional to the saturation magnetization.