

## 니켈-아연 페라이트 소결체와 복합체의 전파흡수특성

조성백 · 오재희

인하대학교 무기재료공학과  
(1994년 7월 29일 접수)

### The Characteristics of Electromagnetic Wave Absorption in Sintered and Composite Ni-Zn Ferrites

Sung-Baek Cho and Jae-Hee Oh

Dept. of Ceramic Eng., Inha University  
(Received July 29, 1994)

#### 요 약

니켈-아연 페라이트 소결체와 복합체를 제조하여 MHz-GHz 영역에서 복소투자율, 복소유전율의 주파수 분산특성 및 전파흡수특성을 조사하였다. 임피던스 정합조건에 영향을 미치는 변수는 소결체는 투자율 실수항과 유전율 실수항이며 복합체는 투자율 실수항, 허수항, 유전율 실수항과 유전손실계수임을 확인할 수 있었다. 니켈-아연 페라이트 소결체에서 유전율을 변화시키는 방안으로 니켈 대신 망간을 치환 첨가함에 따라 정합주파수와 정합 두께를 조절할 수 있었다.

#### ABSTRACT

The frequency dependence of magnetic permeability ( $\mu_c$ ) and dielectric constant ( $\epsilon_c$ ) in MHz-GHz frequency range and their relationships with microwave absorbing properties were investigated in sintered and composite Ni-Zn ferrites, respectively. It was confirmed that zero reflection condition was required the real parts of permeability and permittivity in sintered specimen, and the complex permeability, permittivity and dielectric loss tangent in composite specimen. The real part of permittivity varied with the replacement of nickel by manganese in sintered Ni-Zn ferrite. Therefore, we could control the matching frequency and matching thickness.

**Kew Words:** Complex permeability, Complex permittivity, Impedance matching, Matching frequency, Matching thickness

#### 1. 서 론

단층형 전파흡수체는 이상형 흡수체와 1/4 파장형의 흡수체로 나눌 수 있는데 이상형 흡수체로 동작하기 위해서는 코팅된 복합물질의 복소유전율과 복소투자율이 일치해야 하고 그 복합물질의 손실율이 커야 한다. 또한 코팅의 두께를 파장에 비해 상대적으로 크게 해야 하기 때문에 이상형 흡수체를 실제로 구현하는 데는 많은 어려움이 있다. 1/4 파장형의 흡수체는 특정주파수에서 코팅물질의 복소투자율, 복소유전율 및 코팅두께를 적절히 조절함으로써 반사계수를 zero(영)가 되게 한다.

1/4 파장형의 대표적인 것이 페라이트이며 페라이트는 일반적으로 소결형과 페라이트 분말을 지지체에 섞어서

제조한 복합형으로 나눌 수 있다<sup>1)</sup>. 소결형은 VHF/UHF와 같은 비교적 낮은 주파수 영역에서 우수한 전파흡수특성을 가지는 반면 복합형은 소결형에 비하여 사용주파수가 높고(GHz 영역) 가공성이 우수하여 주로 고주파대역에서 다양하게 응용되고 있다.

일반적으로 전파흡수체의 성능은 정합주파수, 정합두께 및 대역폭 등으로 평가되며 두께가 얇고 대역폭이 넓은 흡수체를 제조하기 위한 연구가 행해지고 있다<sup>2-4)</sup>. 한편 페라이트를 이용한 흡수체인 경우 전파흡수 특성에 영향을 미치는 인자는 복소투자율, 복소유전율, 두께, 주파수 등이 있으며 우수한 흡수체를 제조하기 위해서는 이들의 적절한 조합이 필요하다.

본 연구에서는 Ni-Zn ferrite 소결체와 복합체를 제조

하여 MHz-GHz 영역에서 복소투자율, 복소유전율의 주파수 분산특성 및 전파흡수특성을 비교 분석하였다. 소결체와 복합체인 경우 임피던스 정합조건을 도식화함으로써 정합조건에 영향을 미치는 변수들을 조사하였으며 소결체인 경우 유전율 제어방안으로 Ni의 일부를 Mn으로 치환첨가시켜 정합주파수 및 정합두께를 조절할 수 있었다.

### 2. 실험방법

본 연구에서 선택한 페라이트의 조성은  $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ 에서 예비실험결과 넓은 주파수 영역에서 복소투자율의 손실률이 큰 값을 가지고 있는  $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ 를 선정하였다. 페라이트 소결체 및 복합체의 제조방법은 다음과 같다.

시약급인 출발물질들을 평량한 후 나일론 볼과 플라스틱통을 이용하여 10시간 동안 습식혼합한 후 80°C에서 24시간 이상 건조한 다음 알루미늄 유발을 사용하여 분쇄하고 공기분위기에서 5°C/min의 승온속도로 가열한 다음 900°C에서 2시간 동안 하소하였다. 하소한 분말을 알루미늄 유발로 재분쇄하여 페라이트 분말을 제조하였다.

소결체인 경우는 하소분말에 PVA(polyvinyl alcohol)을 3 wt% 정도 첨가한 후 내경 3 mm, 외경 9 mm인 toroidal mold에 충전시킨 후 80 MPa의 압력으로 가압하여 성형체를 제조하였다. PVA 바인더를 제거하기 위하여 산소가스를 흘려주며 600°C에서 3시간 동안 유지한 후 1250°C에서 2시간 동안 소결하였다. 소결한 시편은 내경 3 mm, 외경 7 mm로 가공하여 제조하였다.

복합체인 경우는 하소분말을 1250°C에서 2시간 동안 열처리하여 페라이트를 합성한 후 분쇄하여 페라이트 분말을 제조하였다. 페라이트 분말에 지지재인 실리콘 고무를 혼합하여 페라이트 분말과 고무의 무게비가 4.0 이고, 외경 7 mm, 내경 3 mm인 toroid형 복합재 시편을 제조하였다.

제조한 페라이트 소결체 및 복합체 시편의 재료정수를 구하기 위하여 Network analyser(HP 8720B)와 Co-axial type의 7 mm air line을 이용하여 200 MHz-10 GHz 범위에서 S-parameter를 측정하고 S-parameter에 의하여 복소투자율과 복소유전율을 계산하였다. 또한 측정된 재료정수로부터 시편의 반사감쇠량을 계산하였다.

### 3. 결과 및 고찰

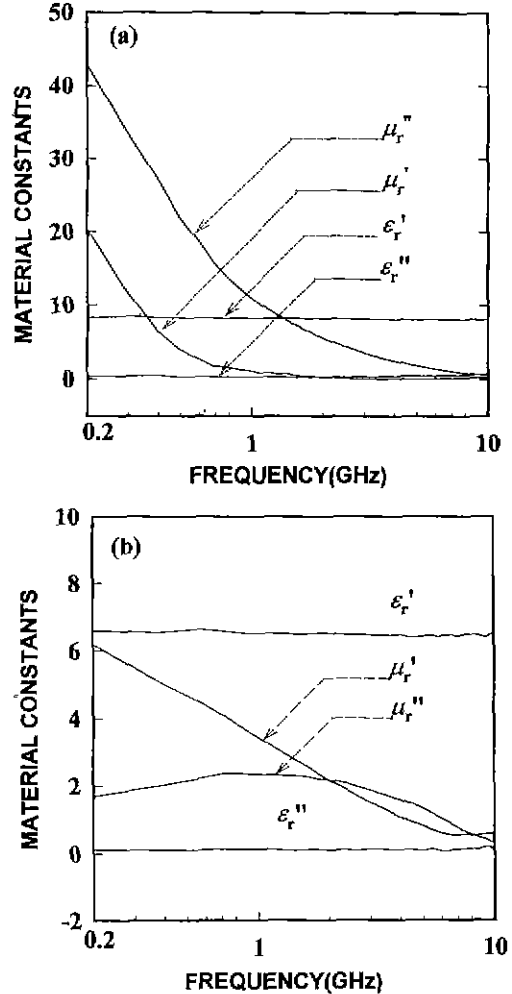


Fig. 1. Material constants vs frequency spectra observed in  $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$  specimens.  
(a) sintered specimen  
(b) composite specimen

#### 3.1. 소결체와 복합체의 재료정수

$Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$  페라이트의 소결체와 복합체 시편의 주파수변화에 따른 재료정수 변화를 Fig. 1에 나타내었다. 소결체 시편의 투자율 실수항( $\mu_r'$ ) 및 허수항( $\mu_r''$ ) 모두 주파수가 증가함에 따라 감소하며  $\mu_r''$ 이  $\mu_r'$ 보다 측정주파수 전영역에서 큰 값을 갖는다. 페라이트는 공명현상이 발생하면  $\mu_r'$ 이 감소하고  $\mu_r''$ 은 특정주파수에서 최대값을 갖고 이후의 주파수에서는 급격히 감소한다. 따라서 측정주파수 대역은 공명현상 이후의 주파수 영역이라 판단된다. 유전율 실수항( $\epsilon_r' = 8$ ) 및 허수항( $\epsilon_r'' = 0.4$ )은 주

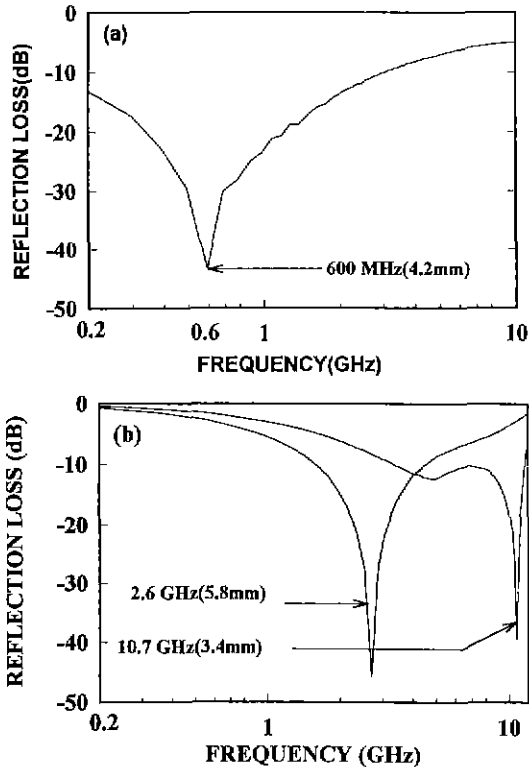


Fig. 2. Microwave absorption of  $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$  specimens with maximum attenuation.  
 (a) sintered specimen  
 (b) composite specimen

파수 변화에 관계없이 일정한 값을 갖고 있다. 복합체 시편 또한 투자율 실수항( $\mu''$ ) 및 허수항( $\mu'''$ ) 모두 소결체와 유사하게 주파수가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보이나 가시나 소결체와는 달리 약 2 GHz 이하의 주파수 영역에서는  $\mu''$ 이  $\mu'''$ 보다 큰 값을 가지며 2 GHz 이상의 주파수 영역에서는  $\mu'''$ 이  $\mu''$ 보다 큰 값을 가지고 있다. 이러한 현상은 복합체인 경우 공명주파수가 측정주파수 영역에 존재하는 것을 의미하며 소결체에 비해 공명주파수가 높다는 것을 보여주고 있다. 유전율은 소결체와 동일하게 실수항( $\epsilon_r' = 6.3$ ) 및 허수항( $\epsilon_r'' = 0.12$ ) 모두 주파수 변화에 관계없이 일정하나 소결체에 비해 다소 낮은 값을 보이고 있다. 복합체 제조시 사용된 실리콘 고무는 이미 보고된 바와 같이 자성손실과 유전손실이 없으며 단지 지지체 역할만 하였다.

Fig. 2는 Fig. 1에서 측정된  $\mu$ 와  $\epsilon$ 로부터 계산한 반사감쇠량(dB)이다. 최대 반사감쇠량을 가진 주파수가 소결체는 한 곳인(600 MHz) 반면 복합체는 두께 변화에 따라 두 군데(2.6 GHz, 10.7 GHz) 존재함을 보이고 있다.

뒷면에 금속판이 부착된 전파흡수체에 평면파가 수직 입사하던 전자파 흡수특성은 재료의 유전율, 투자율과 두께에 의하여 결정된다. 입사한 전자파는 재료와 자유공간의 경계면에서 특성임피던스의 부정합에 의하여 반사가 일어나며, 재료내부로 입사한 파의 일부가 완전히 감쇠되지 않고 다시 자유공간으로 전파하여 또다른 반사파를 형성한다. 자유공간과 재료의 경계면에서의 반사감쇠량(reflection loss)은 아래식으로 표현되어진다.

$$\text{반사감쇠량 [dB]} = 20 \log \frac{\bar{Z}_{IN} - 1}{\bar{Z}_{IN} + 1} \quad (1)$$

$\bar{Z}_{IN}$ 은 규격화(normalized) 입력임피던스로서 아래식과 같다.

$$\bar{Z}_{IN} = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tanh(j \frac{2\pi d}{\lambda} \sqrt{\mu_r \epsilon_r}) \quad (2)$$

여기에서 d는 전파흡수체의 두께이고  $\lambda$ 는 자유공간의 전자파의 파장이며  $\epsilon_r (= \epsilon_r' - j\epsilon_r'')$ ,  $\mu_r (= \mu_r' - j\mu_r''')$ , 은 각각 비유전율과 비투자율이다.

식 (1)에 나타나 있듯이 반사감쇠량은 d,  $\lambda$ ,  $\epsilon_r$ ,  $\mu_r$ 의 함수로 주어지며 특히  $\bar{Z}_{IN} = 1$ 인 조건을 무반사조건 또는 임피던스 정합조건이라 한다.

식 (2)의 해를 구하기 위하여 유전율, 자유공간에서의 전자파의 파장, 전파흡수체의 두께에 특정값을 부여하고,  $\mu_r'$ 과  $\mu_r'''$ 의 영역을 설정한 후  $\mu_r'''$ 을 변화시키면서  $\mu_r'$ 을 계산한다. 이러한 방법으로 구하여진  $\mu_r'$ ,  $\mu_r'''$ 은 유전율의 변화 또는  $d/\lambda$ (또는  $f \cdot d$ )의 변화에 대한 궤적을 형성하며 이를 임피던스 정합 근 궤적이라 한다.

### 3.2. 소결체와 복합체의 임피던스 정합

복소투자율 및 복소유전율의 주파수 분산특성을 정확히 알고 있으면 임피던스 근 궤적도를 이용하여 정합 주파수와 정합두께를 이론적으로 예측할 수 있다. 임피던스 근 궤적도는 유전손실계수( $\tan \delta_e$ )값의 변화에 따라  $f \cdot d$ 의 궤적이 많이 변화된다<sup>9)</sup>. 본 실험에 사용된 소결체는  $\tan \delta_e = 0.05$ , 복합체는  $\tan \delta_e = 0.02$ 의 값을 가지므로 각각의 경우에 맞는 근 궤적도를 이용하였다.

Fig. 1에 나타난 재료정수가 정합조건을 만족하는지를 판단하기 위하여 임피던스 정합 근 궤적도를 재료정수를 적용한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 소결체 시편은  $\epsilon_r' = 8$ 인 선과 600 MHz의 주파수에서 교차함을 알 수 있다. 이로부터 정합주파수( $f_m$ )는 600 MHz이며 이 교차점을 통과하는  $f \cdot d = 2520$ (MHz·mm)값으로부터 정합두께  $d_m = 4.2$  mm가 계산되어진다. 복합체 시편은  $\epsilon_r' = 6.3$ 인 선

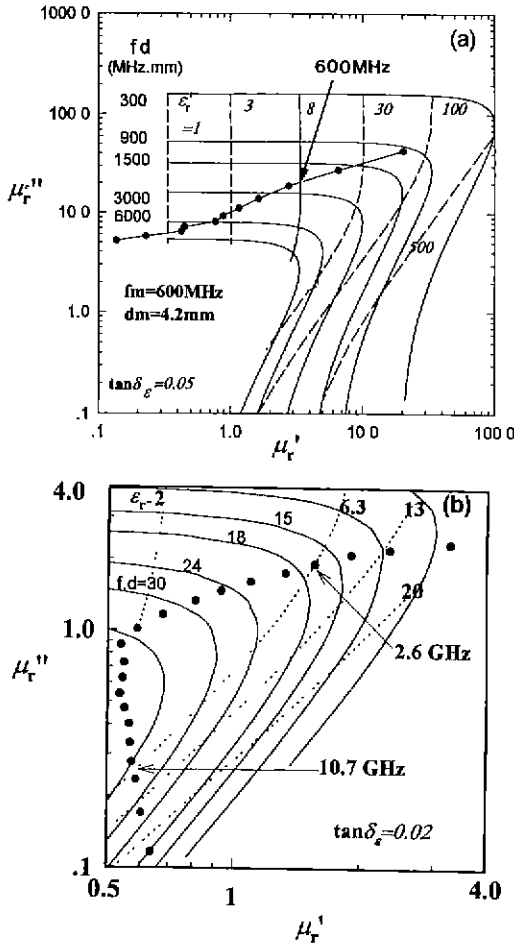


Fig. 3. Impedance matching solution map for zero reflection of  $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$  specimens. (a) sintered specimen (b) composite specimen

과 2.6 GHz, 10.7 GHz의 주파수에서 교차하므로 이 교차점을 통과하는  $f \cdot d = 15.08, 36.38(\text{GHz} \cdot \text{mm})$ 값으로부터 정합두께  $d_m = 5.8, 3.4 \text{ mm}$ 가 계산되어진다. 또한 복합체 시편의 근 궤적으로부터 유전상수( $\epsilon_r'$ )가 증가하면 정합주파수가 증가하는 것을 예상할 수 있다. 특이한 현상은 복합체는 소결체와는 달리 두개의 정합주파수 및 정합두께가 있음을 알 수 있다.

일반적으로 정합주파수는 공명주파수보다 높은 주파수 영역에 존재하므로 3.1절의 재료정수 주파수 분산특성에서 나타났듯이 복합체가 소결체에 비해 정합 주파수가 높은 주파수 영역에 존재한다는 것을 판단할 수 있다. 또한 동일한 조성일지라도 소결체에 비해 고무에 페라이트 분말을 혼합한 복합체인 경우 정합주파수가 상당히

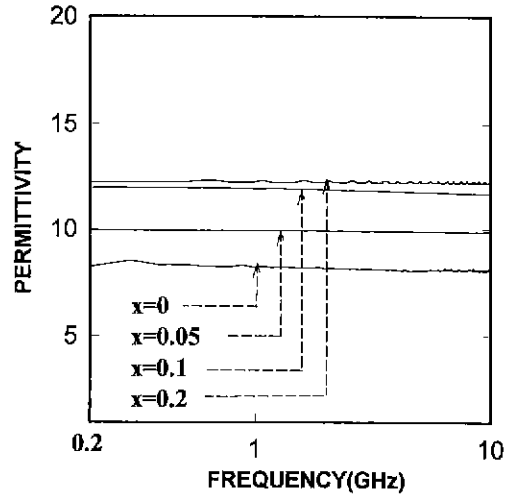


Fig. 4.  $\epsilon_r'$  vs frequency spectra of  $Ni_{0.5-x}Zn_{0.5}Mn_xFe_2O_4$  specimens.

증가됨을 알 수 있으며 이러한 현상은 기 보고된 연구결과와도 일치함을 알 수 있다.

소결체 시편은 하나의 정합주파수와 정합두께가 존재하는 반면 복합체 시편은 두개의 정합점이 존재한다. 또한 Fig. 3의 임피던스 근 궤적으로부터 소결체는  $\mu_r'$ 과  $\mu_r''$ 의 궤적이  $f \cdot d$  궤적의 평편한 영역에 있으므로 유전손실계수의 영향은 거의 없는 반면 복합체는  $\mu_r'$ 과  $\mu_r''$ 의 궤적이 유전손실계수값에 따라  $f \cdot d$  궤적이 많이 변화하는 영역에 존재하므로 유전손실계수가 영향을 미침을 판단할 수 있다.

### 3.3. 소결체 시편의 $\epsilon_r'$ 의 영향

$|\epsilon_r| > |\mu_r|$ 인 경우 흡수체의 정합두께는 식 (3)의 관계로 표시된다<sup>2)</sup>.

$$d/\lambda = 1/4 \sqrt{|\mu_r' \epsilon_r'|} \quad (3)$$

식 (3)로부터 흡수체의 두께는  $\epsilon_r'$ 에 의해 결정됨을 알 수 있다. 식 (3)은 복합체의 경우에 적용되며 이러한 현상을 이용하여 유전을 제어에 의한 박형 전파흡수체의 연구는 저자 등에<sup>9)</sup> 의해 이미 보고되었다.

복합체 시편과는 달리 소결체 시편의 복소투자를 주파수 분산특성처럼 높은 자기손실( $\mu_r'' > \mu_r'$ )과 낮은 유전손실을 가진 흡수체에 있어서 무반사 조건의 요구사항은 아래와 같이 단순한 근사식으로 나타낼 수 있다<sup>9)</sup>.

$$d/\lambda = 1/(2\pi \mu_r'') \quad (4)$$

$$\epsilon_r' = 3\mu_r' \quad (5)$$

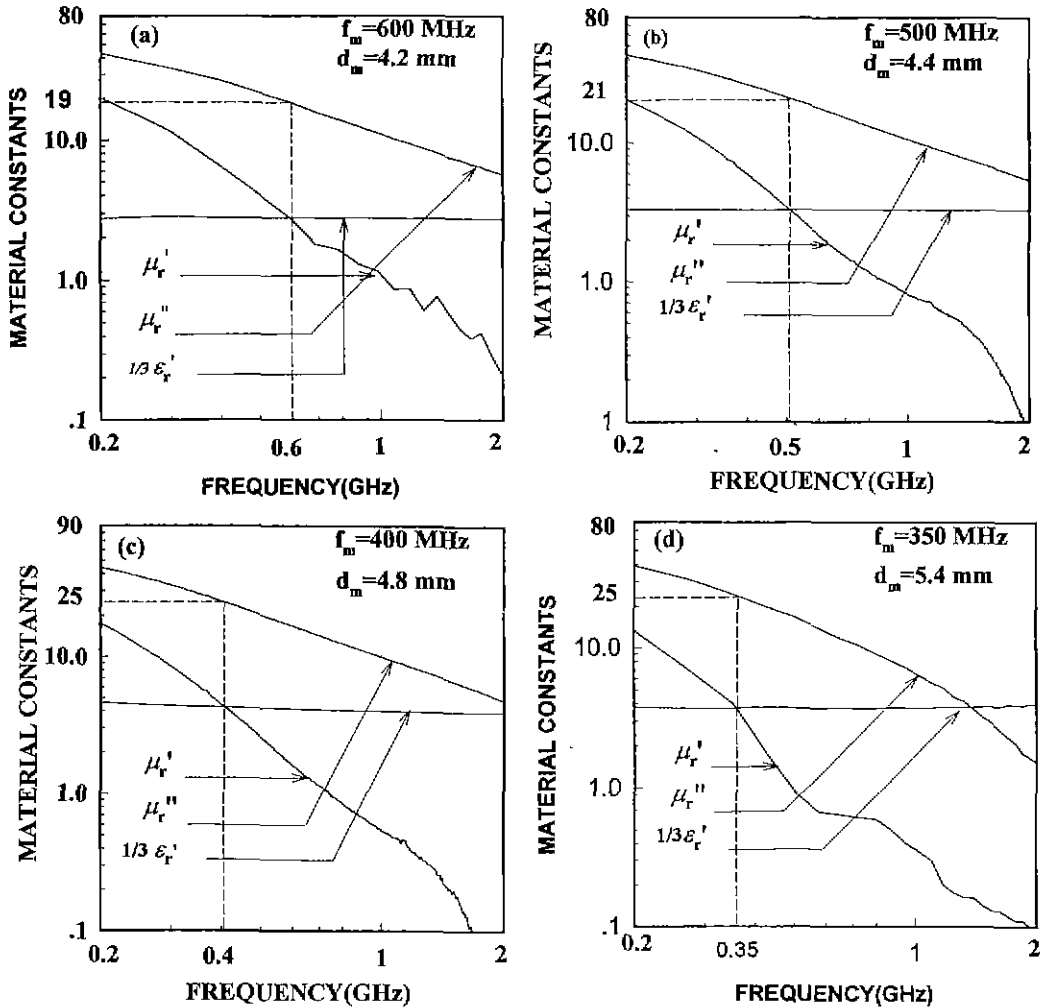


Fig. 5. Theoretical estimation of zero-reflection frequency and absorber thickness in the  $Ni_{0.5-x}Zn_{0.5}Mn_xFe_2O_4$  samples.

(a)  $x=0$  (b)  $x=0.05$  (c)  $x=0.1$  (d)  $x=0.2$

식 (4)로부터 흡수체의 두께는  $\mu_r''$ 에 반비례하여 결정되며 식 (5)는 무반사 조건을 만족할 때의  $\epsilon_r$ 과  $\mu_r$ 의 관계를 나타내고 있다. 식 (5)는 소결체의 전파흡수특성을 결정하는데 효과적으로 사용되어진다.

상기 (3), (5)식들로부터  $\epsilon_r'$ 은 소결체 및 복합체에서 전파흡수특성 조절인자임을 알 수 있다. 소결체 시편에서 유전율( $\epsilon_r'$ )변화가 전파흡수특성에 미치는 영향을 조사하기 위해 니켈(Ni) 대신 망간(Mn)을 일정량( $Ni_{0.5-x}Zn_{0.5}Mn_xFe_2O_4$ ;  $x=0, 0.05, 0.1, 0.2$ ) 치환 첨가한 후 재료 정수의 주파수 분산특성을 조사하였다.

제조조건은  $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$  소결체 시편과 동일하였다. 망간량이 증가함에 따라 복소투자율값은 거의 비슷한

값을 보이고 유전율 실수항은 증가하며(Fig. 4) 유전율이 증가함에 따른 정합주파수와 정합두께의 변화를 근사식인 (4), (5)를 적용하여 Fig. 5에 나타내었다.  $x=0.05$ 로 망간량이 증가하면 정합주파수는 저주파 대역(500 MHz)으로 이동하고 정합두께는 4.4 mm로 증가하였다. 이와 같은 경향은 망간량이 증가할수록 더욱 현저하다.  $x=0.2$ 인 시편의 경우 정합주파수는 350 MHz의 저주파 대역으로 이동하고 정합두께는 5.4 mm로 증가하였다. 망간량이 증가할수록 정합주파수가 저주파 대역으로 이동하는 것은  $\mu_r' = 1/3\epsilon_r'$ 이 성립하는 주파수가 점차 저주파 대역으로 이동함을 의미하며 이러한 현상은  $\epsilon_r'$ 의 증가에 기인한다. 즉 소결체 시편에서 유전율의 실수항( $\epsilon_r'$ )을

증가시키는 것은 정합주파수를 저주파 대역으로 이동시키는 방안이며 정합조건에 직접적인 영향을 미치는 인자는  $\mu_r'$ 과  $\epsilon_r'$ 임을 알 수 있다.

$\mu_r''$ 값은  $x$ 가 증가함에 따라 비슷한( $x=0$   $\mu_r''=19$ ,  $x=0.05$   $\mu_r''=21$ )점으로 보아 망간량이 증가함에 따라 정합 두께가 증가하는 것은 주파수 감소에 따른 파장의 증가에 기인한다고 판단된다. 이것은 망간의 미소량 첨가가 투자율의 큰 변화없이 유전율의 증가에 기여하였기 때문이라고 사료된다.

#### 4. 결 론

$Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$  페라이트를 소결체와 복합체를 제조하여 각각의 임피던스 정합에 영향을 미치는 인자를 조사한 결과 소결체는  $\mu_r'$ 과  $\epsilon_r'$ , 복합체는  $\mu_r'$ ,  $\mu_r''$ ,  $\epsilon_r'$ ,  $\tan\delta_c$  등에 의해 결정되며 소결체 시편은 하나의 정합점이 존재하며 복합체 시편은 두개의 정합점이 존재함을 알 수 있었다. 유전율의 실수값이 증가됨에 따라 소결체는 정합주파수가 감소하고 정합두께가 증가함을 확인할 수 있었다. Ni-Zn ferrite 소결체에서 유전율을 변화시키는 방안으로 니켈 대신 망간을 치환 첨가함에 따라 정합주파수와 정합두께를 조절할 수 있었다.

#### REFERENCES

1. 内藤喜之, "電波吸收體," *オ-ム*, 77-116 (1987).
2. Y. Naito and K. Suetake, "Application of Ferrite to Electromagnetic Wave and Its Characteristics," *IEEE Trans. MTT*, **19**(1), 65-72 (1971).
3. Y. Naito and T. Mizumoto, "Effect of Doping Carbon in a Electromagnetic wave Absorber, Rubber Ferrite," *Trans. IECE Jap.*, J69-C, 3, 258-261 (1986).
4. K. Hatakeyama and T. Inui, "Electromagnetic Wave Absorber Using Ferrite Absorbing Material Dispersed with Short Metal Fiber," *IEEE Trans. Mag.*, **20**(5), 1261-1263 (1984).
5. 조성백, 권경일, 최경구, 김성수, 김재목, "Ni-Zn Ferrite의 전파흡수특성에 미치는 열처리 온도의 영향," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **29**(3), 177-182 (1992).
6. H.M. Musal, Jr. and H.T. Hahn, "Thin-Layer Electromagnetic Absorber Design," *IEEE Trans. Mag.*, **25**(5), 3851-3853 (1989).
7. MB. Amm, J.R. James, "Techniques for Utilization of Hexagonal Ferrites in Radar Absorbers, Part 1 Broadband Planar Coatings," *Radio Electro. Eng.*, **51**(5), 209-218 (1981).
8. 최경구, 조성백, 권경일, 김성수, 김재목, "복합 Ferrite 전파흡수체의 유전율 제어 및 임피던스 정합," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **29**(4), 293-297 (1992).
9. K. Akita, "Contermeasures Against TV Ghost Interference Using Ferrites," in *Ferrites, Proc. of ICF*, 855-889 (1980).