

2종의 Ferrite가 혼합된 복합 Ferrite 전파흡수체의 정합주파수 제어

권형주 · 신재영 · 오재희

인하대학교 무기재료공학과

(1993년 8월 16일 접수)

Control of Matching Frequency of Ferrite Composite Microwave Absorber Consisted of Two Kinds of Ferrites

H.J. Kwon, J.Y. Shin and J.H. Oh

Department of Ceramic Engineering, Inha University

(Received August 16, 1993)

요 약

복합 ferrite 전파흡수체의 성능은 정합주파수, 정합두께, 대역폭 등으로 평가되며 이중 정합주파수는 흡수체의 작동 주파수범위를 결정하기 때문에 전파흡수체의 응용면에서 매우 중요하다. 본 연구에서는 전파흡수체의 정합주파수를 제어하는 방법으로서 Ni-Zn ferrite와 Zn₂Y ferroxplana를 혼합하여 복합 ferrite 전파흡수체를 제조하였으며, 혼합비에 따른 재료정수변화와 전파흡수 특성을 고찰하였다. 복합 ferrite 전파흡수체의 재료정수는 Ni-Zn ferrite와 Zn₂Y의 혼합비를 조절하여 제어할 수 있었으며 이러한 재료정수의 제어에 의하여 흡수체의 정합주파수를 제어할 수 있음을 확인하였다.

ABSTRACT

The performance of ferrite composite microwave absorber has been evaluated as the matching frequency, the matching thickness and the band width. Especially, matching frequency is very important in application of microwave absorber because it determines operating frequency range. In this study, the ferrite composite microwave absorbers consisted Ni-Zn ferrite and Zn₂Y ferroxplana were prepared in order to control matching frequency. Then, the variation of the material constants and microwave absorbing characteristics were investigated with various ferrite mixing ratio. The material constants of ferrite composite microwave absorber could be controlled by variation ferrite mixing ratio. Therefore, it was confirm that matching frequency of microwave absorber could be shifted by control of material constants.

1. 서 론

Ferrite 전파흡수체는 구성형태에 따라서 소결형과 복합형으로 나눌 수 있으며 일반적으로 복합형은 GHz 대역에서 정합이 존재하여 microwave용 전파흡수체로 사용이 가능하다¹⁾. 복합 ferrite 전파흡수체는 ferrite 분말에 지지체인 고무나 유기물을 혼합하여 제조하며 성능은 정합주파수(f_m), 정합두께(d_m), 대역폭(band width) 등으로 평가된다²⁾. 이중 정합주파수는 전파흡수체의 작동 주파수 범위를 한정하기 때문에 정합두께나 대역폭 등 다른 특성보다 우선적으로 고려하여야 할 중요한 특성이다.

복합 ferrite 전파흡수체의 정합주파수를 조절하기 위해서는 흡수체의 재료정수인 복소투자율과 복소유전율을 제어하여야 한다. 복합 ferrite 전파흡수체의 재료정수는 ferrite의 조성 그리고 지지체인 고무와 ferrite의 함량비 등에 의하여 조절할 수 있으나 이와같은 연구는 많은 양의 실험을 진행하여야 하는 단점이 있다. 따라서 보다 효과적으로 복합 ferrite 전파흡수체의 재료정수를 제어하여 정합주파수를 조절하는 방안이 요구된다.

본 연구에서는 재료정수가 현저히 달라 정합주파수가 다른 두 조성의 복합 ferrite 시료를 혼합하여 재료정수를 제어하고자 하였으며 이러한 재료정수변화에 따른 정합주파수의 변화를 고찰하였다.

본 연구에 사용된 ferrite 조성은 복합 ferrite 전파흡수체가 널리 이용되는 주파수범위인 C-X band(4 GHz~12.4 GHz)에서 다른 정합주파수를 갖는 Ni-Zn ferrite ($\text{Ni}_{0.35}\text{Zn}_{0.65}\text{Fe}_2\text{O}_4$)와 Zn_2Y ferroxplana($2\text{BaO} \cdot 2\text{ZnO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$)이며 이러한 ferrite 분말의 혼합비에 따른 재료정수 변화와 전파흡수능간의 상관관계를 구명하였다.

2. 실험방법

본 연구에 사용된 ferrite인 Ni-Zn ferrite($\text{Ni}_{0.35}\text{Zn}_{0.65}\text{Fe}_2\text{O}_4$)와 Zn_2Y ferroxplana($2\text{BaO} \cdot 2\text{ZnO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$) 분말의 제조방법은 다음과 같다. 99% 이상의 순도를 갖는 NiO, ZnO, Fe_2O_3 , BaCO_3 를 평량한 후 나일론볼과 플라스틱 통을 이용하여 10시간 동안 습식혼합하였다. 혼합한 출발물질을 80°C 에서 24시간 이상 건조시킨 후 muffle furnace에서 1300°C, 3시간 열처리하여 Ni-Zn ferrite 및 Zn_2Y 를 합성하고 자동마노유발에서 2시간 분쇄하여 ferrite 분말을 제조하였다.

Spinel ferrite와 Zn_2Y 분말의 혼합비에 따른 복합 ferrite 전파흡수체의 재료정수 변화를 고찰하기 위하여 Ni-Zn ferrite와 Zn_2Y 분말 그리고 silicone 고무를 혼합하여 F/R(ferrite의 무게/고무의 무게)=4.0인 외경 7 mm, 내경 3 mm인 toroid형의 복합 ferrite 전파흡수체를 제조하였다. 이때 사용된 전체 ferrite의 무게에 대하여 Ni-Zn ferrite 분말을 100 w/o에서 0 w/o로 무게비를 변화시켜가며 시편을 제조하였다.

0.2 GHz~13 GHz 범위에서의 복합 ferrite 전파흡수체의 재료정수를 구하기 위하여 HP8720B network analyzer를 이용하여 산란계수인 S-parameter를 측정하고, S-parameter에 의하여 복소투자율($\mu_r' - j\mu_r''$)과 복소유전율($\epsilon_r' - j\epsilon_r''$)을 계산하였다³⁾. 그리고 계산된 재료정수에 의하여 복합 ferrite 전파흡수체의 주파수변화에 따른 반사감쇠량(dB)을 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서 기본이 되는 복합 Ni-Zn ferrite 시편과 복합 Zn_2Y 시편의 재료정수를 Fig. 1에 나타내었다. 복합 Ni-Zn ferrite 시편과 복합 Zn_2Y 시편은 주파수가 증가함에 따라 투자율 실수항(μ_r')이 감소하고 있으며 복합 Zn_2Y 시편에 비하여 복합 Ni-Zn ferrite 시편이 더욱 급격히 감소하고 있다. 투자율 허수항(μ_r'')을 보면 복합 Ni-Zn ferrite 시편과 복합 Zn_2Y 시편이 각각 0.55GHz와 3.4GHz 부근에서 최대가 되며 그 이상의 주파수에서는

점차 감소함을 알 수 있어 복합 Zn_2Y 시편인 경우 투자율 허수항이 최대가 되는 주파수는 복합 Ni-Zn ferrite 시편에 비하여 높음을 알 수 있다.

일반적으로 ferrite는 공명현상이 발생하면 투자율 실수항(μ_r')이 급격히 감소하며 허수항(μ_r'')은 특정 주파수에서 최대값을 갖고 이후의 주파수에서는 감소한다⁴⁾. Fig. 1에서 고찰할 수 있듯이 주파수가 증가함에 따라 복합 ferrite 시편의 투자율 실수항(μ_r')이 감소하며 투자율 허수항(μ_r'')이 고유 주파수에서 최대값을 갖는 현상은 본 연구에 사용한 복합 Ni-Zn ferrite 시편과 복합 Zn_2Y 시편이 측정 주파수 범위에서 공명현상이 발생하기 때문이라 판단되어진다.

Ferrite 분말과 고무로 구성된 복합 ferrite 시편의 공명주파수는 ferrite 조성⁵⁾, 고무와 ferrite의 함량비⁶⁾, 그리고 ferrite 분말의 입자크기⁷⁾ 등에 의존하게 된다. 본 실험에서 복합 Ni-Zn ferrite 시편과 복합 Zn_2Y 시편 제조에 사용된 ferrite 분말의 입자크기와 함량비는 동일한 조건이기 때문에 복합체의 공명주파수에 영향을 미치는 인자는 ferrite 조성이라고 할 수 있다. Spinel ferrite의 공명현상은 자화용이 방향이 c면에 존재하는 ferroxplana보다 낮은 주파수에서 발생하기 때문에⁸⁾ Fig. 1의 결과와 같이 복합 Ni-Zn ferrite 시편은 복합 Zn_2Y 시편에 비하여 낮은 주파수에서 공명이 발생하게 된다.

주파수 변화에 따라서 복소투자율이 크게 변하는 현상과는 달리 복소유전율은 복합 Ni-Zn ferrite 시편과 복합 Zn_2Y 시편의 실수항인 경우 각각 6과 8.2 그리고 허수항인 경우 각각 0.14와 0.9 정도의 일정한 값을 갖고 있음을 확인하였다. 따라서 본 연구에 사용된 복합 Ni-Zn ferrite 시편과 복합 Zn_2Y 시편의 유전손실($\tan\delta$)은 각각 약 0.02와 0.1인 미소한 값을 갖고 있어 손실의 대부분은 자성손실임을 알 수 있으며 이러한 자성손실은 복합체내의 ferrite 분말에 의하여 발생하는 것이다.

복합 Ni-Zn ferrite 시편과 복합 Zn_2Y 시편이 정합조건을 만족하는지를 확인하기 위하여 1층형 전파흡수체의 설계방안인 정합조건 graph에 재료정수를 적용하여 그 결과를 고찰하였다.

1층형 전파흡수체가 수직입사된 전자파를 완전히 흡수하기 위한 정합조건은 다음의 식 (1)과 같다¹⁰⁾.

$$Z = 1 = \sqrt{\mu_r/\epsilon_r} \tanh[j(2\pi/C)\sqrt{\mu_r \cdot \epsilon_r} \cdot f \cdot d] \quad (1)$$

여기서 Z는 규격화 입력임피던스, μ_r 는 복소투자율($\mu_r' - j\mu_r''$), ϵ_r 은 복소유전율($\epsilon_r' - j\epsilon_r''$), C는 공기중의 광속, f는 주파수 그리고 d는 흡수체의 두께이다. 식 (1)의 풀이는 유전손실을 고려한 복소유전율항과 f·d항을 일정한 값

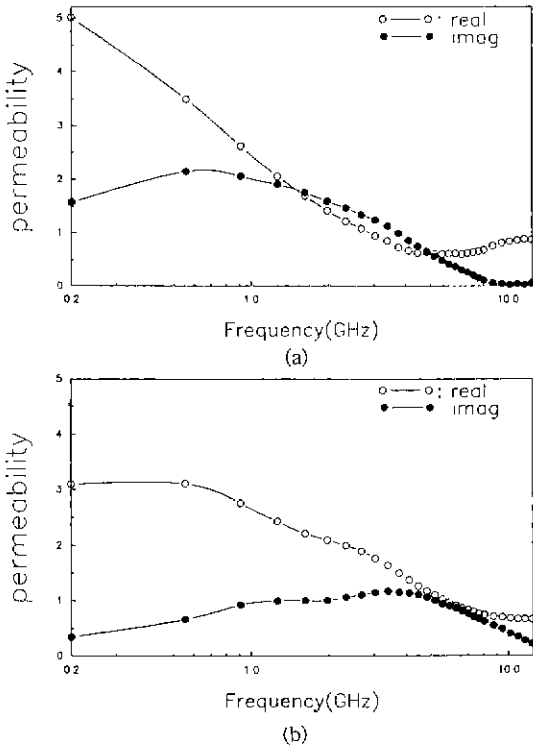


Fig. 1. Frequency dependences of the complex permeability of Ni-Zn ferrite composite and Zn_2Y composite.
 (a) Ni-Zn ferrite composite
 (b) Zn_2Y composite

으로 고정시킨 후 Z 가 1일 때의 복소투자율항을 계산한다. 일련의 유전율항과 $f \cdot d$ 항에 대하여 Z 가 1을 만족할 때의 복소투자율값을 계산하여 그림으로 나타낸 것이 정합조건 graph이다. 이와같은 정합조건 graph를 이용하면 1층형 전파흡수체의 정합조건 일치여부와 정합이 일어날 때의 정합주파수 및 정합두께를 정량적으로 예측이 가능하다^{8,9)}.

Fig. 1과 같은 재료정수를 갖는 복합 ferrite 시편이 정합조건을 만족하는지를 고찰하기 위하여 전파흡수체의 정합조건 graph에 재료정수를 적용시키고 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 본 연구에 사용된 복합 Ni-Zn ferrite 시편과 복합 Zn_2Y 시편의 유전손실항(dielectric loss tangent, $\tan\delta_e$)이 각각 0.02와 0.1이어서 같은 정합조건 graph에 적용시킬 수가 없기 때문에 각각 $\tan\delta_e = 0.02$ 와 $\tan\delta_e = 0.1$ 에 해당하는 정합조건 graph를 작성하고 이를 응용하였다.

Fig. 2(a)는 정합조건 graph에 복합 Ni-Zn ferrite 시

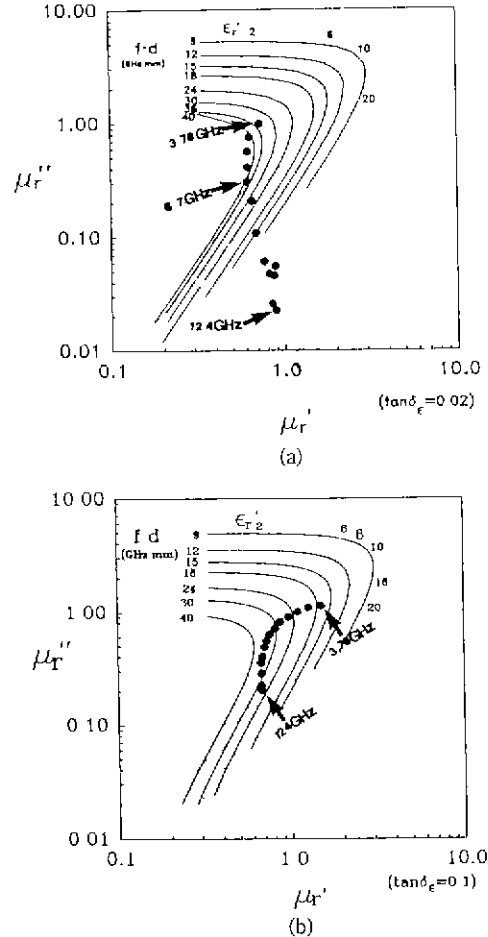


Fig. 2. The complex permeability locus of ferrite composites on matching solution map.
 (a) Ni-Zn ferrite composite
 (b) Zn_2Y composite

편의 복소투자율 궤적을 나타낸 것이다. Fig. 2(a)를 고찰하여 보면 복소투자율궤적과 유전율실수항이 6인 궤적이 교차하는 주파수인 6.7 GHz에서 정합이 발생함을 알 수 있으며 이때의 $f \cdot d$ 항이 36 GHz·mm이기 때문에 정합조건을 만족할 때의 정합두께가 5.4 mm 내외임을 예측할 수 있다.

Fig. 2(b)는 정합조건 graph에 복합 Zn_2Y 시편의 복소투자율 궤적을 나타낸 것이다. Fig. 2(b)를 고찰하여 보면 복소투자율 궤적과 유전율 실수항이 8인 궤적이 교차하는 주파수인 12.4 GHz에서 정합이 발생함을 일 수 있으며 이때의 $f \cdot d$ 항이 32 GHz·mm이기 때문에 정합조건을 만족할 때의 정합두께가 2.6 mm내외임을 예측할 수 있다.

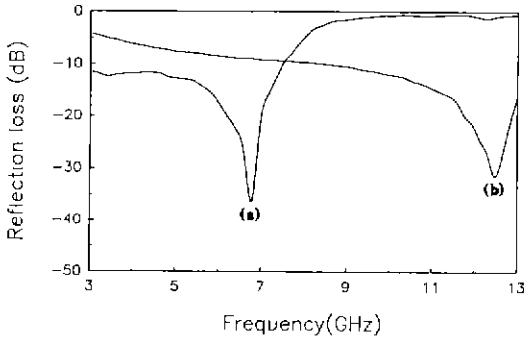


Fig. 3. The calculated reflection loss of ferrite composites.
 (a) Ni-Zn ferrite composite (d=5.4 mm)
 (b) Zn₂Y composite (d=2.6 mm)

이와같이 예측된 복합 Ni-Zn ferrite 시편과 복합 Zn₂Y 시편의 정합주파수와 정합두께가 전파흡수능 결과와 일치하는지를 알아보기 위하여 Fig. 1에서 고찰한 복합 ferrite 시편의 재료정수에 의한 반사감쇠량(dB)을 계산하였다.

1층형 전파흡수체의 반사감쇠량(dB)은 다음 식 (2)에 의하여 계산이 가능하다¹⁰⁾.

$$\text{Reflection loss(dB)} = 20 \log \left| \frac{Z-1}{Z+1} \right| \quad (2)$$

식 (2)에서 Z는 식 (1)로 정의되는 규격화 입력임피던스이다. 주파수변화에 따른 복합 ferrite 전파흡수체의 규격화 입력임피던스를 식 (1)에 의하여 구하고 식 (2)에 의하여 주파수변화에 따른 반사감쇠량(dB)을 계산하였다. 즉, 복소투자율과 복소유전율의 주파수의존성으로부터 전파흡수체의 전파흡수능을 계산하였다.

Fig. 3에 복합 Ni-Zn ferrite 시편과 복합 Zn₂Y 시편이 정합조건을 만족할 때의 전파흡수능을 계산하여 나타내었다. 복합 Ni-Zn ferrite 시편인 경우 정합주파수가 6.7 GHz이며 복합 Zn₂Y 시편인 경우 정합주파수가 12.4 GHz이어서 정합주파수가 현저히 차이가 남을 확인할 수 있다. 이와같은 정합주파수의 차이는 Fig. 2에 제시한 정합조건 graph내에서의 복소투자율 제적이 ferrite 조성 차이에 의하여 다른 거동을 나타내기 때문이다.

이와같이 복소투자율이 현저히 달라서 각각 6.7 GHz와 12.4 GHz의 정합주파수를 갖는 복합 Ni-Zn ferrite 전파흡수체와 복합 Zn₂Y 전파흡수체를 혼합하여 복합 ferrite 전파흡수체를 만들 경우, 혼합비에 따른 복합 ferrite 전파흡수체의 재료정수와 전파흡수능과의 상관관계를

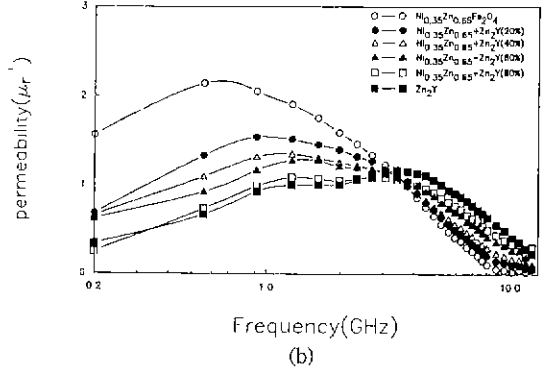
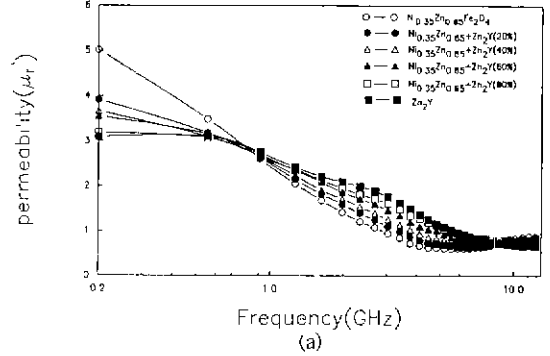


Fig. 4. Frequency dependences of the complex permeability of ferrite composites.

고찰하였다. Fig. 4에 Ni-Zn ferrite와 Zn₂Y를 혼합하여 복합 ferrite 전파흡수체를 만들었을 때 혼합비에 따른 복소투자율의 변화를 나타내었다. 이때 혼합비는 무게 비로 하여 실험을 진행하였다.

Fig. 4의 결과를 고찰하여 보면 Ni-Zn ferrite에 Zn₂Y를 혼합함에 따라서 복합 ferrite 전파흡수체의 복소투자율은 복합 Ni-Zn ferrite 시편의 값에서 복합 Zn₂Y 시편의 값으로 점차 빈하고 있음을 알 수 있어 ferrite 혼합비에 따라서 복합 ferrite 전파흡수체의 재료정수를 적절히 제어할 수 있음을 확인하였다. 그리고 투자율 허수항을 고찰하여 보면, Zn₂Y의 첨가량이 증가함에 따라서 투자율 허수항이 최대가 되는 주파수가 0.55 GHz에서 3.4 GHz로 일정하게 이동하는 현상을 관찰할 수 있는데 이는 높은 주파수에서 공명현상이 발생하는 Zn₂Y의 첨가에 의하여 공명주파수가 점차 이동하기 때문이라 판단된다.

이와같이 재료정수가 현저히 차이가 나는 Ni-Zn ferrite와 Zn₂Y를 혼합하여 재료정수를 적절히 제어한 복합 ferrite 전파흡수체의 계산된 전파흡수능을 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 5를 고찰하여 보면 Ni-Zn ferrite에 Zn₂Y를 0, 20,

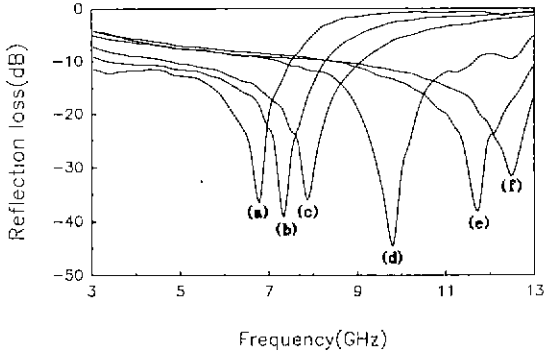


Fig. 5. The calculated reflection loss of ferrite composites.

- (a) Ni-Zn ferrite (100 w/o) composite
- (b) Ni-Zn ferrite (80 w/o)+Zn₂Y(20 w/o) composite
- (c) Ni-Zn ferrite (60 w/o)+Zn₂Y(40 w/o) composite
- (d) Ni-Zn ferrite (40 w/o)+Zn₂Y(60 w/o) composite
- (e) Ni-Zn ferrite (20 w/o)+Zn₂Y(80 w/o) composite
- (f) Zn₂Y (100 w/o) composite

40, 60, 80 그리고 100 w/o 혼합하였을때 복합 ferrite 전파흡수체의 정합주파수가 각각 6.7, 7.2, 7.8, 9.5, 11.6 그리고 12.4 GHz로 규칙적으로 증가함을 알 수 있어 ferrite 혼합비에 따라서 복합 ferrite 전파흡수체의 정합주파수를 적절하게 제어할 수 있음을 알 수 있다. 이때의 정합두께는 Table 1과 같다. Zn₂Y가 증가함에 따라 정합두께는 감소하며, 정합두께는 정합주파수와 반비례관계가 있음을 확인할 수 있었다.

일반적으로 ferrite 전파흡수체의 정합주파수는 공명주파수와 비례관계에 있어 높은 주파수에서 공명현상이 일어나는 흡수체일수록 높은 주파수에서 정합조건을 만족하게 된다³⁾. Fig. 5에서 복합 ferrite 전파흡수체의 정합주파수가 규칙적으로 변하는 현상은 ferrite 혼합비에 따라서 공명현상이 일정하게 이동하는 Fig. 4의 결과에 기인한다고 판단된다. 따라서 재료정수가 현저히 달라

각각 6.7 GHz와 12.4 GHz의 정합주파수를 갖는 복합 Ni-Zn ferrite 시편과 복합 Zn₂Y 시편을 혼합하여 C-X band에서의 정합주파수를 조절할 수 있었으며, 이러한 2종의 ferrite를 혼합하여 복합 ferrite 전파흡수체의 정합주파수를 제어하는 방법은 효과적임을 확인하였다.

4. 결 론

복합 ferrite 전파흡수체의 정합주파수를 제어하는 방법으로서 6.7 GHz에서 정합조건을 만족하는 복합 Ni-Zn ferrite 전파흡수체와 12.4 GHz에서 정합조건을 만족하는 복합 Zn₂Y 전파흡수체를 혼합하여 혼합비에 따른 재료정수와 전파흡수능을 고찰한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

복합 Ni-Zn ferrite 시편에 혼합한 Zn₂Y의 양이 증가함에 따라 복합 ferrite 전파흡수체의 정합주파수는 6.7 GHz에서 12.4 GHz로 증가하였으며 정합두께는 5.4 mm에서 2.8 mm로 감소하였다. 이와같이 재료정수가 다른 Ni-Zn ferrite와 Zn₂Y의 혼합비를 조절하여 복합 ferrite 전파흡수체의 정합주파수와 정합두께를 제어할 수 있었으며 이러한 결과는 2종의 ferrite 혼합비에 따른 복합 ferrite 전파흡수체의 복소투자율 제어에 의한 것임을 확인하였다.

REFERENCES

1. 内藤喜之, "電波吸收體," *ホーム*, 77-116 (1987).
2. Y. Naito and K. Suetake, "Application of Ferrite to Electromagnetic Wave Absorber and Its Characteristics," *IEEE Trans Microwave Theory and Tech*, **19**(1), 65-72 (1971).
3. W.B. Weir, "Automatic Measurement of Complex Dielectric Constant and Permeability at Microwave Frequencies," *Proc. IEEE*, **62**(1), 33-36 (1974).
4. J. Smit and H.P.J. Wijn, "Ferrites," Philips's Technical Library. 268-300 (1959).
5. D.I. Kang, J.Y. Shm, and J.H. Oh, "The Microwave Absorbing Characteristics of NiZnCo Ferrite Composite Microwave Absorber." *Ferrites: Proc. 6th Int.*

Table 1. The Matching Thickness of Ferrite Composites in This Study

Sample	S : 100 w/o Z : 0 w/o	S : 80 w/o Z : 20 w/o	S : 60 w/o Z : 40 w/o	S : 40 w/o Z : 60 w/o	S : 20 w/o Z : 80 w/o	S : 0 w/o Z : 100 w/o
d _m	5.4 mm	4.7 mm	4.1 mm	3.1 mm	2.8 mm	2.6 mm

(S : Ni-Zn ferrite, Z : Zn₂Y ferroxplana)

- Conf. Ferrites, 1335-1338 (1992).
6. 신재영, 오재희, "복합 ferroxplana 전파흡수체의 재료 정수의 진파흡수특성," 한국자기학회지, 1(2), 49-54 (1991).
 7. T. Nakamura, S. Yamamoto, T. Tsutaoka, S. Shimizu, E. Hanku, and K. Hatakeyama, "Permeability Dispersion of Ni-Zn Ferrite Composite in RF Frequency Region," Ferrites. Proc. 6th Int. Conf. Ferrites, 1298-1301 (1992).
 8. H.M. Musal, Jr. and H.T. Hahn, "Thin-Layer Electro-magnetic Absorber Design," *IEEE Trans. Mag.*, **25**(5), 3851-3853 (1989).
 9. S.S. Kim, S.B. Jo, K.I. Gueon, K.K. Choi, J.M. Kim and K.S. Kim, and K.S. Churn, "Complex Permeability and Permittivity and Microwave Absorption of Ferrite-Rubber Composite in X-band Frequencies," *IEEE Trans. Mag.*, **27**(6), 5462-5464 (1991).
 10. 乾哲司. "電波吸收體," *エレクトロニクセラミクス*, 冬號, 18-24 (1985).