

유전율제어에 의한 복합 Ferrite 전파흡수체의 성능향상

신재영 · 권형주 · 오재희

인하대학교 무기재료공학과

(1993년 7월 23일 접수)

Microwave Absorbing Characteristic Improvement by Permittivity Control of Ferrite Composite Microwave Absorber

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

Department of Ceramic Engineering, Inha University

(Received July 23, 1993)

요 약

Ferrite 전파흡수체의 특성은 재료정수(복소투자율, 복소유전율)와 밀접한 관계를 갖고 있어 재료정수를 제어하는 것이 전파흡수체의 성능향상에 매우 중요하다. 본 연구에서는 C-X band(4 GHz~12.4 GHz)에서 정합조건을 만족하지 않는 복합 ferrite 전파흡수체의 유전율을 제어하여 전파흡수특성을 향상시키는 방법에 대하여 고찰하였다. 복합 ferrite 시편에 graphite의 첨가량을 조절함으로써 유전율 실수항을 제어할 수 있었으며 이와같이 복합 ferrite 시편의 유전율 실수항을 제어하여 정합조건을 만족시키는 방법은 전파흡수특성을 향상시키는 매우 유용한 방법임을 확인하였다.

ABSTRACT

The material constants(the complex permeability and permittivity) of ferrite composite determine its microwave absorbing characteristics. Therefore, in order to improve the microwave absorbing characteristics, it is necessary to control the material constants of the ferrite composite. In this study, the method of improving microwave absorbing characteristics by control of permittivity of ferrite composite which has not satisfying matching condition in C-X band (4 GHz~12.4 GHz) was investigated. It was possible to control the permittivity by adjusting graphite loading ratio in the ferrite composite microwave absorber. It was also concluded that the control of permittivity of ferrite composite is effective method to improve the microwave absorbing characteristics.

1. 서 론

현대사회는 전자 통신 산업의 발달과 더불어 전자파 환경이 날로 증가하는 추세에 있다. 각종 전자기기 등에서 발생하는 유해한 전자파는 기기상호간의 동작방해를 유발하거나 인체에 해를 미칠 수 있어 이에 대한 대책이 요구되고 있다. 불필요한 전자파를 제거하기 위한 구체적인 방법으로는 EMI filter, shield재, ferrite bead, 전파흡수체 등이 있으며 사용하는 용도에 따라서 이들 부품을 적절히 이용하여야 한다.

전파흡수체는 입사하는 전자파를 흡수하여 반사계수가 특정치 이하의 값을 갖도록 설계된 재료로서 도전손실

재료, 유전손실재료, 자성손실재료 등으로 구성할 수 있으며¹⁾ 이중 자성손실을 이용한 ferrite 전파흡수체가 성능이 우수하여 널리 이용되고 있다.

Ferrite 전파흡수체는 구성조건에 따라서 소결형과 복합형으로 나눌 수 있으며 소결형 ferrite 전파흡수체는 MHz대역에서, 복합형 ferrite 전파흡수체는 GHz 대역에서 주로 이용되며 성능은 정합주파수, 정합두께, 대역폭 등으로 평가 된다²⁾. 이와같은 전파흡수체의 성능은 흡수체의 재료정수인 복소투자율($\mu_r' - j\mu_r''$)과 복소유전율($\epsilon_r' - j\epsilon_r''$)에 의하여 결정되기 때문에 재료정수의 제어에 의한 전파흡수체의 성능향상이 가능하다.

본 연구에서는 정합조건을 만족하지 않아 전파흡수능

Table 1. Ferrite Composition (Weight %)

BaCO ₃	Co ₃ O ₄	Fe ₂ O ₃
14.2	5.7	80.1

이 우수하지 않은 복합 ferrite 시편의 유전율을 제어함으로써 정합조건을 만족시키는 방안에 대하여 고찰하였다. 복합 ferrite 시편의 유전율을 제어하는 방안으로 graphite를 첨가하였으며 graphite 함량에 따른 복합 ferrite 시편의 재료 정수와 전파흡수특성 변화를 검토하였다.

2. 실험방법

본 연구에 사용한 ferrite는 Co₂X ferroplana로서, 그 출발물질 조성을 Table 1에 나타내었다. 99% 이상의 순도를 갖는 출발물질을 나일론볼과 플라스틱통을 이용하여 10시간 동안 습식혼합한 후 80℃에서 24시간 건조하였다. 건조한 출발물질을 muffle furnace에서 1300℃, 3시간 열처리하여 ferrite를 합성하였다.

합성한 ferrite를 자동마노유발에서 2시간 분쇄하여 ferrite 분말을 제조하였으며 이와같이 제조된 ferrite 분말에 일정량의 silicone 고무를 혼합하여 ferrite 분말과 고무의 무게비가 3.0이고, 외경 7 mm, 내경 3 mm인 toroid형의 복합 ferrite 시편을 제조하였다. 그리고 ferrite 분말에 대한 무게비로 graphite를 5, 6, 7, 8 w/o 첨가한 후 silicone 고무로 혼합하여 graphite가 혼합된 복합 ferrite 시편을 제조하였다. 이때 graphite 첨가에 의한 복소투자율의 변화를 최소로 하기 위하여 복합체내의 ferrite 양은 일정하게 고정하였다.

제조한 복합 ferrite 시편의 재료정수를 구하기 위하여 Network Analyzer(HP8720B)를 이용하여 4~12.4 GHz 범위에서의 S-parameter를 측정하고, S-parameter에 의하여 복소투자율($\mu_r' - j\mu_r''$)과 복소유전율($\epsilon_r' - j\epsilon_r''$)을 계산하였다. 또한 측정된 재료정수에 의하여 복합 ferrite 시편의 반사감쇠량을 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

Graphite를 첨가하지 않은 복합 ferrite 시편의 주파수변화에 따른 재료정수변화를 Fig. 1에 나타내었다. 본 실험에서 지지재로 사용한 silicone 고무의 재료정수는 예비실험을 통하여 $\mu_r' = 1$, $\mu_r'' = 0$, $\epsilon_r' = 2.8$, $\epsilon_r'' = 0$ 임을 확인하였으며 이러한 결과로부터 silicone 고무는 자성 손실 및 유전손실이 없음을 알 수 있었다. 복합 ferrite

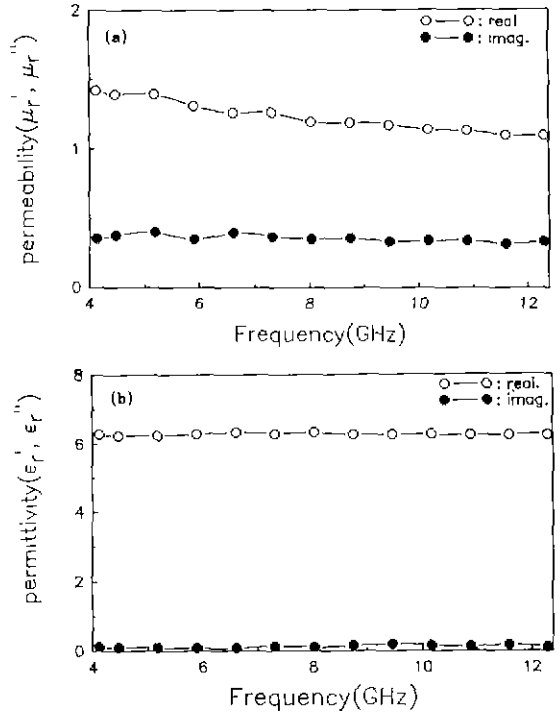


Fig. 1. Frequency dependence of the material constants of ferrite composite. (a) frequency dependence of permeability (b) frequency dependence of permittivity

시편의 투자율 실수항(μ_r')은 1.5~1.0 정도의 값을, 투자율 허수항(μ_r'')은 0.35 정도의 값을 갖고 유전율 실수항(ϵ_r') 및 유전율 허수항(ϵ_r'')은 각각 6과 0.12로서 주파수변화에 관계없이 일정한 값을 갖는다.

Ferrite는 공명현상이 발생하면 투자율의 실수항(μ_r')이 감소하고, 허수항(μ_r'')은 특정주파수에서 최대값을 갖고 이후의 주파수에서는 급격히 감소한다³⁾.

측정주파수가 증가함에 따라 투자율의 실수항이 점차 감소하고, 투자율의 허수항이 거의 일정한 값을 갖는 Fig. 1의 결과로부터 복합 ferrite 시편은 4 GHz 이전의 주파수대역에서 공명현상이 발생하고 측정 주파수대역인 4~12.4 GHz 대역은 공명현상 이후 주파수영역이라 판단된다.

1층형 전파흡수체가 수직입사된 전자파를 완전히 흡수하기 위한 정합조건은 다음의 식 (1)과 같다⁴⁾.

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

여기서 Z는 규격화 입력임피던스, μ_r 는 복소투자율($\mu_r' -$

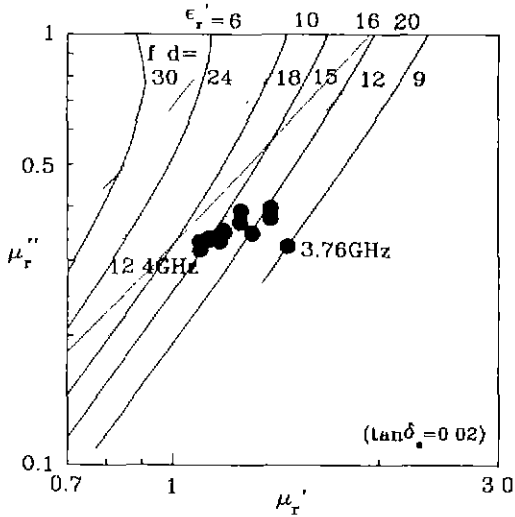


Fig. 2. The complex permeability locus of ferrite composite on matching solution map.

$j\mu_r''$). ϵ_r 은 복소유전율($\epsilon_r' - j\epsilon_r''$), C 는 공기중의 광속, f 는 주파수 그리고 d 는 흡수체의 두께이다. 전파흡수체가 정합조건을 만족하기 위해서는 규격화 입력임피던스 Z 가 1이어야 하며 식 (1)의 변수가 μ_r' , μ_r'' , ϵ_r' , ϵ_r'' , f 그리고 d 이므로 이들 제어인자를 엄격히 제어하여야 한다.

식 (1)의 풀이는 유전손실을 고려한 복소유전율항과 $f \cdot d$ 항을 일정한 값으로 고정시킨 후 Z 가 1일 때의 복소투자율항을 계산하여 구한다. 일련의 유전율항과 $f \cdot d$ 항에 대하여 Z 가 1을 만족할 때의 복소투자율값을 계산하여 그림으로 나타낸 것이 정합조건 graph(matching solution map)이다. 이와같은 정합조건 graph에 응용하고자 하는 재료의 재료정수를 적용시킴으로써 정합조건의 일치여부와 정합조건을 만족할때의 정합주파수 및 정합두께를 예측할 수 있어 1층형 전파흡수체의 설계방안으로 활용이 가능하다^{4,5)}.

Fig.1과 같은 재료정수를 갖는 복합 ferrite 시편이 정합조건을 만족하는지를 판단하기 위하여 복합 ferrite 시편의 재료정수를 정합조건 graph에 적용시키고 그 결과를 Fig.2에 나타내었다. 이때 graphite를 첨가하지 않은 복합 ferrite 시편의 유전손실항($\tan\delta_s$)이 약 0.02 이어서 $\tan\delta_s$ 이 0.02인 정합조건 graph에 재료정수를 적용시키고 그 결과를 고찰하였다.

Fig.2를 고찰하여 보면 복합 ferrite 시편의 복소투자율 계적으로부터 복합 ferrite 시편이 정합조건을 만족하기 위해서는 유전율실수항이 20 내외의 값을 가져야 함을 알 수 있다. 그러나 복합 ferrite 시편은 Fig.1에서 고찰한

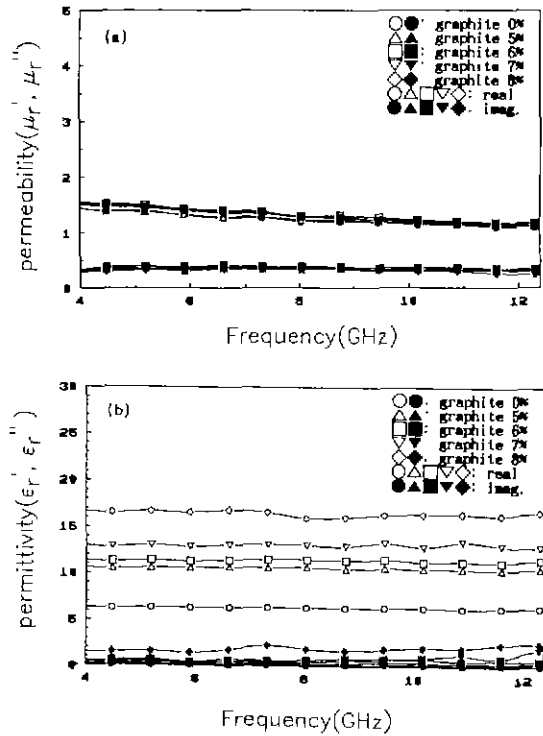


Fig. 3. Frequency dependence of the material constants of ferrite composites with various graphite contents.

- (a) frequency dependence of permeability
- (b) frequency dependence of permittivity

바와 같이 유전율 실수항이 약 6 정도이어서 정합조건을 만족하지 않아 전파흡수체로서 응용 가능성이 없다. 따라서 복합 ferrite 시편의 유전율 실수항을 증가시킬 수 있는 첨가제로서 graphite를 선택하여 graphite 첨가량에 따른 재료정수의 변화를 검토하였다.

Fig.3에 graphite 첨가량에 따른 복합 ferrite 시편의 재료정수 변화를 나타내었다. Graphite를 첨가함에 따라서 복합 ferrite 시편의 복소투자율은 큰 변화가 없으나 복소유전율은 graphite 첨가량이 증가함에 따라서 비례적으로 증가함을 알 수 있다.

Ferrite-graphite-고무로 구성된 복합체에서 비자성체인 graphite와 고무는 투자율의 실수항(μ_r')은 1, 허수항(μ_r'')은 0으로서 일정한 값을 나타냄을 확인하였다. Graphite의 함량을 증가시킨 복합 ferrite 시편의 투자율 실수항 및 허수항은 변화가 미소하여 고려의 대상에서 제외하였다

복합 ferrite 전파흡수체에 graphite를 5, 6, 7, 8 w/o

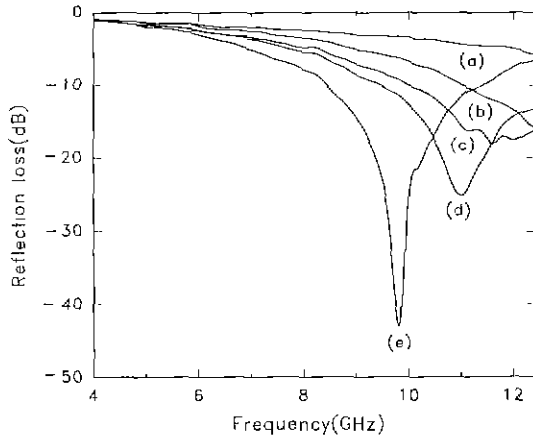


Fig. 4. The calculated reflection loss of ferrite composites with various graphite contents.
 (a) graphite content = 0 wt.%(d = 1.7 mm)
 (b) graphite content = 5 wt.%(d = 1.7 mm)
 (c) graphite content = 6 wt.%(d = 1.7 mm)
 (d) graphite content = 7 wt.%(d = 1.7 mm)
 (e) graphite content = 8 wt.%(d = 1.7 mm)

첨가한 경우 유전율 실수항은 각각 11, 12, 14, 16으로 증가하였으며 허수항 또한 점차 증가하는 Fig. 3의 결과로부터 graphite의 첨가에 의하여 복합 ferrite 시편의 유전율 실수항을 적절히 제어할 수 있음을 알 수 있다.

Graphite가 첨가된 복합 ferrite 시편의 전파흡수능을 고찰하기 위하여 복합체 시편의 주파수변화에 따른 반사감쇠량(dB)을 계산하였다. 앞선 연구자^{4,5)}에 의하면 시편의 규격화 입력임피던스에 의하여 계산된 반사감쇠량과 측정에 의한 반사감쇠량이 차이가 없음을 보고하였기 때문에 본 연구에서는 계산에 의하여 시편의 반사감쇠량을 계산하였다. 1층형 전파흡수체의 반사감쇠량(dB)는 다음의 식 (2)에 의하여 계산이 가능하다⁶⁾.

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

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.

Fig. 4에 graphite 함량에 따른 복합 ferrite 시편의 계산된 반사감쇠량(dB)을 나타내었다. Fig. 4를 고찰하여 보면 복합 ferrite 시편내의 graphite 함량이 증가함에 따라 최대 반사감쇠량이 점차 증가하고 있으며 특히 gra-

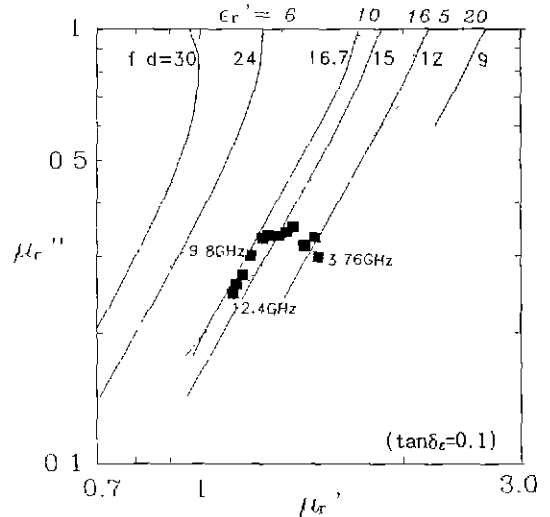


Fig. 5. The complex permeability locus of ferrite composite with graphite content 8 wt.% on matching solution map.

phite 함량이 8w/o인 경우에 반사감쇠량이 40dB 이상 이어서 정합 조건을 만족함을 알 수 있다. 그리고 정합 조건을 만족할 때의 정합두께가 1.7mm임을 확인하였다.

Graphite 함량이 증가함에 따라 반사감쇠량이 증가하는 이유는 복합 ferrite 시편의 유전율 실수항의 증가에 의하여 정합조건에 보다 근접하기 때문이라 판단되며, graphite가 8w/o 첨가되어 시편의 유전율 실수항이 약 16인 시편인 경우 반사감쇠량이 40 dB 이상의 값을 나타내어 정합조건을 만족하는 현상을 정합 조건 graph를 이용하여 정량적으로 검증하였다.

Fig. 5에 graphite가 8w/o 첨가된 복합 ferrite 시편의 복소투자를 궤적을 정합조건 graph에 나타내었다. Graphite가 8w/o 첨가된 복합 ferrite 시편의 유전손실항(tanδc)은 Fig. 3에서 고찰한 것과 같이 약 0.1이어서 tanδc이 0.1인 정합조건 graph를 작성하고 이를 이용하였다.

Fig. 2에서의 결과와는 달리 Fig. 5를 고찰하여 보면 유전율 실수항이 16이상일때 정합조건을 만족함을 알 수 있는데 이는 유전손실항이 graphite 첨가에 의하여 0.02에서 0.1로 증가하여 정합조건 graph상에서의 정합조건이 이동하였기 때문이다⁵⁾. Fig. 5를 고찰하여 보면 복소투자를 궤적과 εr' = 16.5인 선이 교차하는 점이 있어 복합 ferrite 시편이 정합조건을 만족하며 정합조건을 만족할 때의 주파수는 9.8 GHz이고 두께는 1.7 mm 내외임을 알 수 있다. 이와같이 정합주파수가 9.8 GHz이고 정합두께가 1.7 mm인 정량적인 값은 Fig. 4에서 고찰한

결과와 일치한다.

이와같이 전파흡수능이 우수하지 않은 복합 ferrite 시편의 복소투자를 궤적을 정합조건 graph에 적용하여 정합조건을 만족하기 위한 유전율 실수항값을 정량적으로 도출하고, graphite의 첨가에 의하여 유전율을 제어함으로써 복합 ferrite 시편의 정합조건을 만족시키는 방안은 매우 효과적임을 알 수 있다.

4. 결 론

정합조건을 만족하지 않은 복합 ferrite 시편의 유전율을 제어하여 전파흡수특성을 향상시키는 방안에 대해서 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 복합 ferrite 시편의 복소투자를 궤적을 정합조건 graph에 적용하여 정합조건을 만족하기 위한 유전율 실수항값을 정량적으로 도출하고, 복합 ferrite 시편의 유전율 실수항을 제어하여 정합조건을 만족시키는 방법은 매우 유용한 방법임을 확인하였다.

2. 복합 ferrite 전파흡수체에 graphite를 5, 6, 7, 8 w/o 첨가한 경우 유전율실수항은 각각 11, 12, 14, 16으로 증가하였으며 graphite의 첨가에 의하여 복합 ferrite 시편의 유전율 실수항을 적절히 제어할 수 있음을 알 수 있었다.

감사의 글

이 연구는 1992년도 인하대학교 연구비 지원에 의하여 수행되었습니다.

REFERENCES

1. 内藤喜之, "電波吸收體," 오ーム社, 53-57 (1987).
2. Y. Nato and K. Suetake, "Application of Ferrite to Electromagnetic Wave Absorber and Its Characteristics," *IEEE Trans. MTT*, **19**(1), 65-72 (1971).
3. J. Smit and H.P.J. Wijn, "Ferrites," Philips's Technical Library, 268-300 (1959).
4. S.S. Kim, S.B. Jo, K.I. Gueon, K.K. Choi, J.M. 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).
5. H.M. Musai, Jr. and H.T. Hahn, "Thin-Layer Electromagnetic Absorber Design," *IEEE Trans. Mag.*, **25**(5), 3851-3853 (1989).
6. 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).