

복합 ferroxplana 전파흡수체의 재료정수와 전파흡수 특성

신재영 · 오재희

인하대학교 무기재료공학과

(1991년 9월 4일 받음)

본 연구에서는 복합 ferroxplana 전파흡수체의 X-band에서의 재료정수와 전파흡수특성과의 상관관계를 구명하였다. Ferroxplana 분말과 지지재인 고무와의 함량비(F/R)가 증가함에 따라 μ_r 은 감소하며, μ_i 은 증가하였다. 전파흡수체의 두께가 증가함에 따라 최대반사감쇠량이 얻어지는 주파수가 낮은쪽으로 이동하였으며, 흡수체의 두께가 2.6mm인 경우에는 대역폭이 우수하였고, 두께가 3.2mm인 경우에는 반사감쇠량이 우수하였다. 복합 ferroxplana 전파흡수체의 재료정수를 광대역화에 요구되는 전파흡수체의 재료정수영역에 적용하여 전파흡수특성을 정량적으로 도출하였으며 이러한 재료정수영역의 설정은 광대역 ferrite 전파흡수체의 설계지침으로 활용이 가능하다.

I. 서 론

전파암실, T.V. ghost 장해대책, 각종 전자기기의 누설전파방지등의 목적으로 쓰이는 전파흡수체는 주로 자성손실, 유전손실 그리고 도전손실을 이용한 것이다 [1]. 이중 자성손실을 이용한 ferrite 전파흡수체는 다른 손실을 이용한 전파흡수체보다 성능이 우수하여 널리 이용되고 있다.

Ferrite 전파흡수체는 구성조건에 따라 소결형과 복합형으로 나눌수 있으며 이중 복합 ferrite 전파흡수체는 정합주파수가 높으며 두께가 얇아 GHz 대역의 전파흡수체로 사용되어지고 있다 [2].

전파흡수체의 특성은 반사감쇠량, 정합주파수, 두께 그리고 비대역폭등으로 평가되며 일반적으로 고성능 전파흡수체란 두께가 얇으며 대역폭이 넓고 반사감쇠량이 큰 전파흡수체를 의미한다. 이러한 전파흡수체의 특성은 흡수체의 재료정수(복소투자율과 복소유전율)와 밀접한 관련이 있기 때문에 재료정수와 전파흡수특성과의 관계를 정립하는것이 전파흡수체의 성능개선연구의 선결과제이다.

본 연구의 목적은 X-band(8~12.4 GHz)에서의 복합 ferrite 전파흡수체의 재료정수와 반사감쇠량, 정합주파수, 두께, 대역폭등의 전파흡수특성과의 상관관계를 정립하는데 있다. X-band에서 전파흡수특성이 우수한 ferrite중의 하나인 ferroxplana분말과 지지재인 silicone 고무를 혼합하여 복합 ferrite 전파흡수체를 제조하였으며, 이들

시편의 제조조건에 따른 재료정수의 변화를 검토하고, 재료정수와 전파흡수특성간의 상관관계를 구명하였다.

II. 실험방법

본 연구에서 사용된 복합 ferrite 전파흡수체의 제조방법은 다음과 같다. 시약급인 출발물질을 ball mill을 이용하여 10시간 혼합한 후 80℃에서 24시간이상 건조하였다. 건조된 출발물질을 tube furnace에서 1300℃, 3시간 열처리하여 ferroxplana을 합성하였다. 합성된 ferroxplana을 agate mortar에서 2시간 분쇄하여 ferroxplana 분말을 제조하였다. 이와같이 제조된 ferroxplana 분말과 지지재인 일정량의 silicone 고무와 혼합하여 ferrite분말 혼합비(F/R:ferrite와 고무의 무게비)에 따른 복합 ferrite 전파흡수체 시편을 제조하였다.

X-band(8~12.4 GHz)에서의 복합 ferrite 전파흡수체의 재료정수를 구하기 위하여 HP8510B Network Analyzer를 이용하여 10.2 mm×22.9 mm인 사각도파관에 삽입된 재료에 대한 S-parameter를 측정하고, S-parameter에 의하여 복소투자율($\mu_r, -j\mu_i$)과 복소유전율($\epsilon_r, -j\epsilon_i$)을 계산하였다. 또한 이들 시편의 전파흡수능을 측정하기 위하여 외경 7mm, 내경 3mm인 동축관을 이용하여 시편두께에 따른 X-band에서의 반사감쇠량(dB)을 측정하였다.

III. 실험결과 및 고찰

1. 복합 ferroxplana 전파흡수체의 재료정수

복합 ferrite 전파흡수체의 제조에 사용된 ferroxplana 분말의 주사전자 현미경사진을 Fig. 1에 나타내었다. 평균 $5\mu\text{m}$ 이하의 입자크기를 갖고 있음을 알 수 있다.

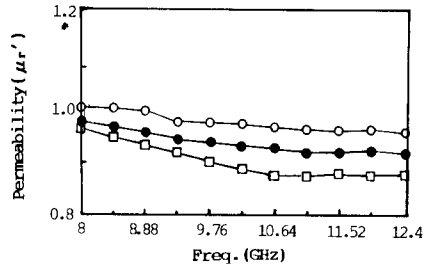


Fig. 1. Scanning electron micrograph of ferroxplana powder.

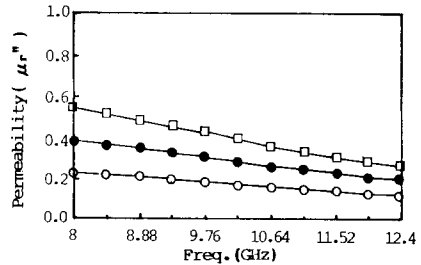
본 실험에서 지지재로 사용한 silicone고무의 X-band에서의 재료정수는 예비실험을 통하여 $\mu_r' = 1$, $\mu_r'' = 0$, $\epsilon_r' = 2.8$, $\epsilon_r'' = 0.05$ 임을 확인하였으며 이러한 결과로부터 silicone고무는 자성손실($\tan \delta\mu$) 및 유전손실($\tan \delta\epsilon$)이 없음을 알 수 있었다.

이와같은 silicone 고무에 ferrite분말혼합비인 F/R가 1, 2, 3이 되도록 ferroxplana분말을 혼합하여 복합 ferrite 전파흡수체 시편을 제조한 후 X-band에서의 재료정수(복소투자율, 복소유전율)를 측정된 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 복합 ferrite 전파흡수체 시편내의 ferrite함량비가 증가함에 따라 투자율의 실수항(μ_r')은 점차 감소하며 투자율의 허수항(μ_r'')은 점차 증가함을 알 수 있다. 또한 유전율의 실수항(ϵ_r')은 점차 증가하고 있으며 유전율의 허수항(ϵ_r'')은 ferrite함량비에 관계없이 거의 일정한 값을 나타내고 있는데 이는 유전손실이 너무 작아 측정시 발생된 오차라고 생각되어진다.

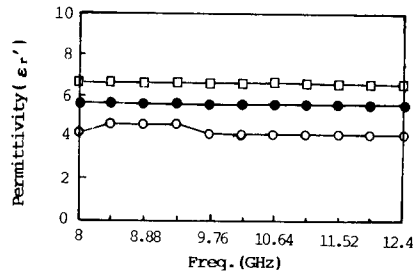
Fig. 2의 재료정수와 비자성체인 silicone 고무의 재료정수를 연관지어 고찰하여 보면, ferroxplana자체의 μ_r'



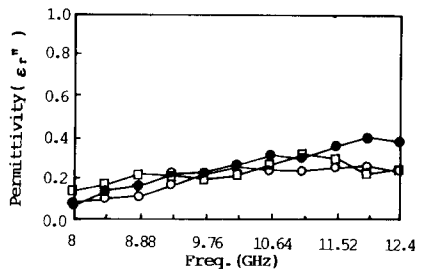
(a) Permeability(Real.)



(b) Permeability(Imag.)



(c) Permittivity(Real.)



(d) Permittivity(Imag.)

Fig. 2. The material constants spectra of ferroxplana composites with various ferrite loading ratio.
○ : F/R=1.0, ● : F/R=2.0, □ : F/R=3.0

은 1보다 작은 값을 갖고 있음을 알 수 있으며 자성손실이 없는 지지재와 혼합하였을 때 μ_r'' 이 증가하는 것으로 보아 자성손실이 큼을 확인할 수 있다. 반면에 ferroxplana 자체의 ϵ_r 은 silicone 고무보다 큼을 알 수 있으며 유전손실은 자성손실에 비해 작음을 알 수 있다.

Fig. 2의 결과로부터 본 연구에 사용된 복합 ferrite 전파흡수체는 F/R=3인 경우 자성손실($\tan \delta \mu$)이 약 0.6~0.3정도의 값을 갖고 있는 반면에 유전손실($\tan \delta \epsilon$)은 약 0.02인 값을 갖고 있어 손실의 대부분은 자성손실임을 알 수 있다.

일반적으로 ferrite는 공명주파수이상의 주파수영역에서 μ_r' 과 μ_r'' 은 감소한다. 또한 ferrite분말을 지지재와 혼합하여 복합화 하였을때 공명현상은 ferrite소결체의 공명주파수보다 높은 주파수에서 일어나는데 이는 동일한 ferrite조성이라도 결정입자가 작을수록, 기공이 많을수록 그리고 자구가 세분화할 수록 공명현상이 높은 주파수에서 일어나기 때문이다[3, 4].

Fig. 2에서 시편의 복소투자율의 주파수의존성을 고찰하여 보면 주파수가 증가함에 따라 투자율의 실수항 및 허수항 모두 감소함을 알 수 있는데, 이는 X-band인 8~12.4 GHz 영역은 복합 ferroxplana 전파흡수체인 경우 공명현상 이후의 주파수 영역이기 때문이라 생각된다.

Fig. 2의 결과와 같이 복합 ferrite 전파흡수체의 ferrite 함량비를 변화시킴에 따라 재료정수를 변화시킬 수 있으며 이러한 재료정수는 이후에 언급하는 전파흡수특성에 큰 영향을 미친다.

2. 복합 ferroxplana 전파흡수체의 전파흡수특성

1층형 전파흡수체의 정합조건은 식(1)과 같이 규격화 입력임피던스 \hat{Z} 가 1일 때이며 식(1)의 변수는 $\mu_r', \mu_r'', \epsilon_r', \epsilon_r'', fd(\text{GHz}\cdot\text{mm})$ 등 5가지이다[5].

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

여기서 μ_r 은 복소투자율, ϵ_r 은 복소유전율, C는 공기중의 광속, f는 주파수 그리고 d는 흡수체의 두께이다. 식(1)에 대한 풀이는 유전손실을 고려한 복소유전율값과 fd를 일정한 값으로 고정시킨 후 정합이 일어나는 복소투자율을 graph화하여 나타낸다. 만일 특정주파수에서 어떤 시편의 복소투자율과 유전율을 알고 있다면 식(1)을 만족하는 정합조건 graph에 적용시켜 정합조건과의 일치여부를 판단할 수 있으며 정합이 일어난다면 교점에서의 fd(GHz·mm)를 읽어 정합주파수와 두께를 알 수 있다.

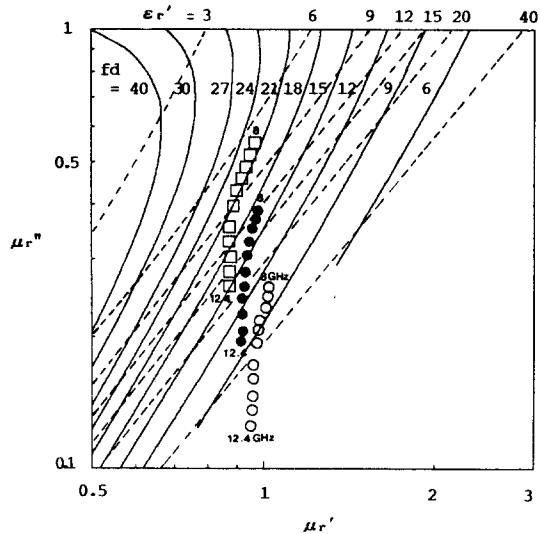


Fig. 3. Graph of matching condition and the permeability of ferroxplana composites with various ferrite loading ratio.

○ : F/R=1.0, ● : F/R=2.0, □ : F/R=3.0

Fig. 3에 식(1)을 만족하는 정합조건 graph와 이 graph에 III. 1절에서 고찰한 ferrite 함량비에 따른 복합 ferroxplana 전파흡수체의 투자율값을 적용시킨 결과를 나타내었다. F/R=1인 경우 정합을 만족하기 위해서는 복합 ferroxplana 전파흡수체의 ϵ_r' 이 약 40정도의 값을 갖아야 하나 실제로는 Fig. 2(c)의 결과로부터 알 수 있듯이 약 4정도의 값을 갖고 있어 정합조건을 만족하지 않는다. F/R=2인 경우 정합을 만족하기 위해서는 ϵ_r' 이 약 12~20정도의 값을 갖아야 하나 실제로는 약 5.8 정도의 값을 갖고 있어 정합조건을 만족하지 않는다. 반면 F/R=3인 시편인 경우 정합을 만족하기 위해서는 ϵ_r' 이 약 7~15정도의 값을 갖어야 하며 실제로 이시편의 ϵ_r' 이 6.6이어서 정합조건에 근접함을 알 수 있다. 이때의 fd(GHz·mm)는 21과 24사이의 값을 지나고 있어 이 시편이 정합조건을 만족시키기 위해서는 두께가 약 2.6~3mm 정도임을 예측할 수 있다.

F/R이 3이며 두께가 2.6 mm인 복합 ferroxplana 전파흡수체의 계산된 전파흡수능과 실측된 전파흡수능을 비교하여 Fig. 4에 나타내었다. 이때 전파흡수능 계산은 각 주파수에서의 재료정수를 식(1)의 규격화 입력임피던스식에 대입하여 임피던스 \hat{Z} 을 구하고 임피던스 \hat{Z} 로부터 반사감쇠량(dB)를 계산하여 구한 것이다. Fig.

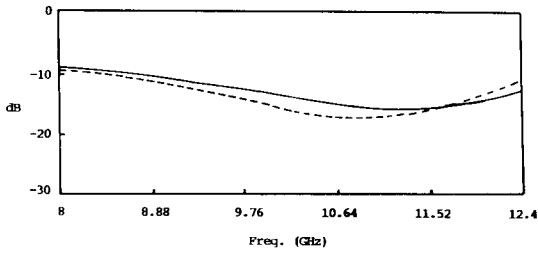


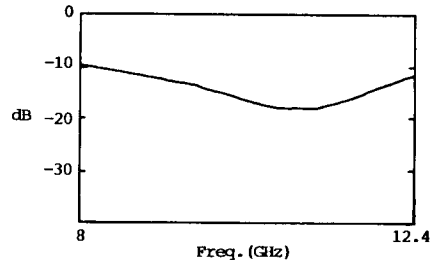
Fig. 4. The measured and calculated reflection loss(dB) of ferroplana composite. (F/R=3.0, d=2.6 mm)
 —; Measured, ---; Calculated

4의 결과로부터 계산치와 측정치는 잘 일치하고 있음을 알 수 있으며 이는 본 연구에서 인용한 재료정수와 반사 감쇠량 data 측정이 큰 오차없이 잘 진행된 것임을 의미한다.

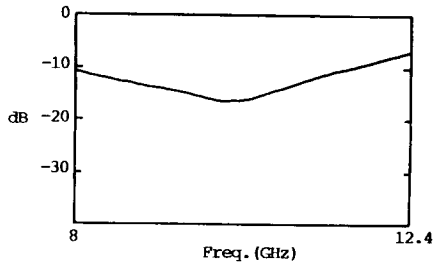
Fig. 3의 결과로부터 전파흡수특성이 우수하리라고 예상되는 F/R이 3인 복합 ferroplana 전파흡수체의 두께변화에 따른 전파흡수특성 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 두께가 증가함에 따라 최대반사감쇠량이 얻어지는 주파수가 낮은쪽으로 이동하였다. 두께가 2.6mm인 시편인 경우 반사감쇠량은 10.9 GHz에서 -18 dB이며, -10 dB의 반사감쇠량을 기준으로 하였을 때 대역폭이 X-band 영역에 걸쳐 매우 넓음을 알 수 있다. 반면에 두께가 3.2mm인 시편인 경우 대역폭은 두께가 2.6mm인 시편에 비하여 우수하지 않지만 반사감쇠량은 8 GHz 부근에서 -25 dB로 우수함을 알 수 있다. 이와 같은 전파흡수특성을 재료정수와 연관지어 고찰하면 다음과 같다.

3. 전파흡수특성과 재료정수와의 상관관계

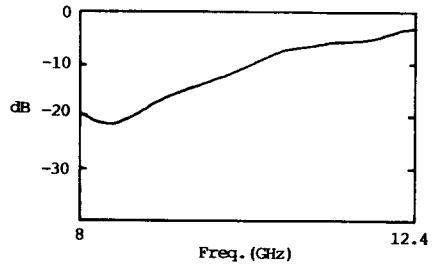
Fig. 6에 $\epsilon_r = 6.6$, $\tan \delta_\epsilon = 0.02$ 로 일정할 때의 정합 조건식(1)에 대한 풀이와 X-band의 시작, 중간, 그리고 마지막 주파수에 해당하는 8, 10.2 그리고 12.4 GHz에서의 -10 dB 영역을 구하여 graph로 나타내었다. 여기서 $\epsilon_r = 6.6$, $\tan \delta_\epsilon = 0.02$ 는 F/R이 3인 복합 ferroplana 전파흡수체의 X-band에서의 평균값이며 Fig. 6(a) 및 (b)는 각각 두께 2.6 mm 및 3.2mm인 시편을 적용시킨 결과이다. Fig. 6내의 가는 점선으로 표시된 불규칙한 원은 각 주파수(8, 10.2, 12.4 GHz)에서의 -10 dB 이상의 반사감쇠량을 갖는 복소투자율의 영역을 의미한다. 세모점은 각 주파수에서의 정합조건을 의미하며, fd (GHzmm)는 각 주파수에서 갖는 fd 값이다. 또한 graph내의 굵은선은 F/R이 3인 시편의 복소투자율값을 주파수 8~12.4 GHz 범위에서 측정하여 plotting 한 것이다. 즉 Fig. 6(a) 및 (b)는



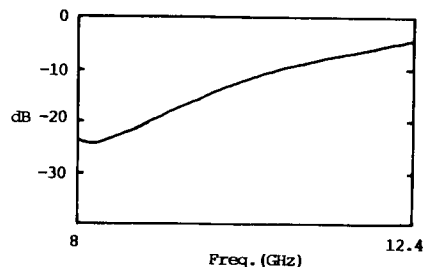
(a) d=2.6mm



(b) d=2.8mm

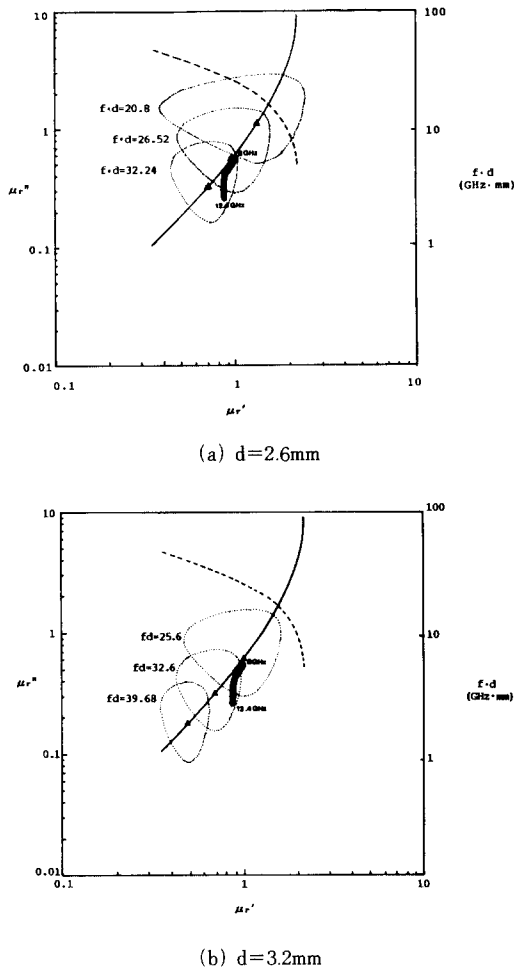


(c) d=3.0mm



(d) d=3.2mm

Fig. 5. The reflection loss(dB) of ferroplana composite with various thickness. (F/R=3.0)



— : complex permeability which satisfy matching condition.
 --- : f·d which satisfy matching condition.
 ○ : -10 dB area.
 △ : matching point.
 — : complex permeability of ferroxplana composite(F/R=3.0).

Fig. 6. The matching condition and -10 dB area with various f·d value.(F/R=3.0, $\epsilon' = 6.6$, $\tan\delta_\epsilon = 0.02$)

2.6 mm 및 3.2 mm의 두께를 갖는 전파흡수체가 8, 10.2 그리고 12.4 GHz의 각주파수에서 -10 dB이상의 반사감쇠량을 갖기 위한 복소투자율의 영역을 의미한다.

두께가 2.6 mm인 복합 ferroxplana 전파흡수체를 적용시킨 결과인 Fig. 6(a)를 고찰하여 보면 주파수가 8 GHz

에서의 복소투자율값은 8 GHz에 해당하는 $f \cdot d = 20.8(\text{GHz} \cdot \text{mm})$ 에서의 정합조건에는 벗어나지만 -10 dB 영역에 근접하고 있으며 10.2 GHz($f \cdot d = 26.52 \text{ GHz} \cdot \text{mm}$)와 12.4 GHz($f \cdot d = 32.24 \text{ GHz} \cdot \text{mm}$)에서의 복소투자율값은 -10 dB 영역내에 포함되어 있기 때문에 Fig. 5(a)에서 알 수 있듯이 두께가 2.6 mm인 시편은 8 GHz에서 약 -10 dB에 해당하는 반사감쇠량을 갖고 있으며 10.2 GHz와 12.4 GHz에서는 -10 dB이상의 반사감쇠량을 갖음을 알 수 있다. Fig. 6(b)는 두께가 3.2 mm인 복합 ferrite 시편을 적용시킨 결과이며 이를 고찰하여 보면 주파수가 8 GHz에서의 복소투자율값은 8 GHz에 해당하는 $f \cdot d = 25.6(\text{GHz} \cdot \text{mm})$ 에서의 정합조건에 근접하고 있으며 10.2 GHz($f \cdot d = 32.6 \text{ GHz} \cdot \text{mm}$)에서의 복소투자율 값은 -10 dB 영역에 포함되어 있고, 12.4 GHz($f \cdot d = 39.68 \text{ GHz} \cdot \text{mm}$)에서의 복소투자율값은 -10 dB 영역으로부터 벗어나 있기 때문에 Fig. 5(d)에서 알 수 있듯이 두께가 3.2 mm인 시편은 8 GHz에서 약 -25 dB에 해당하는 반사감쇠량을 갖고 있으며 10.2 GHz에서는 -10 dB이상의 반사감쇠량을 그리고 12.4 GHz에서는 -10 dB이하의 반사감쇠량을 갖음을 알 수 있다.

위의 결과로부터 복합 ferrite 전파흡수체의 전파흡수 특성은 재료정수와 밀접한 관계가 있으며 성능이 우수한 전파흡수체를 설계하기 위해서는 Fig. 6과 같이 재료정수와 전파흡수특성과의 상관관계를 검토하여 정립하는 것이 선결과제임을 알 수 있다.

IV. 결론

복합 ferroxplana 전파흡수체의 X-band에서의 재료정수와 전파흡수특성과의 상관관계를 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Ferroxplana 분말과 지지재인 고무와의 함량비(F/R)가 증가함에 따라 복합 ferroxplana 전파흡수체의 투자율의 실수항(μ_r')은 점차 감소하며, 투자율의 허수항(μ_r'')은 점차 증가하였다.
2. F/R이 3인 복합 ferroxplana 전파흡수체인 경우 두께를 2.6 mm로 하였을 때 대역폭이 우수하였으며 두께가 3.2 mm인 경우에는 반사감쇠량이 우수하였으며 두께가 증가함에 따라 최대 반사감쇠량이 얻어지는 주파수가 낮은 쪽으로 이동하였다.
3. -10 dB이상의 반사감쇠량이 얻어지는 복합 ferrite 전파흡수체의 재료정수영역을 설정하고 이러한 재료정

수영역에 복합 ferroxplana 전파흡수체의 재료정수를 적용하여 반사감쇠량, 정합주파수, 두께, 대역폭등의 전파흡수특성을 정량적으로 도출하였으며, 이와 같은 재료정수영역의 설정은 광대역 ferrite 전파흡수체의 설계지침으로 활용이 가능하다.

참 고 문 헌

[1] 内藤喜之 “電波吸收體”, 오ーム社, pp. 53~57. (1987)

[2] 内藤喜之, 末武國弘, 藤原英二, 佐藤正明, “ゴムフェライト 吸收壁의 電波吸收特性”, 電子通信學會 論文誌, 52-B(4), pp. 242~247(1969).

[3] 德江哲夫, 石野健, “HF~VHF帶用 フェライト의 燒結條件と 磁氣特性의 關係”, 電子通信學會 論文誌, 52-C(6), pp. 299~304(1969).

[4] 石野健, 市原謙一, “樹脂 フェライト”, 세라믹스, 14 (3), pp.202~209(1979).

[5] 内藤喜之 “電波吸收體”, 오ーム社, pp. 85~89. (1987)

The Material Constants and Microwave Absorbing Characteristics of ferroxplana Composite Microwave Absorber

J. Y. Shin and J. H. Oh
*Department of Ceramic Engineering,
Inha University*

(Received 4 September 1991)

In this study the correlation between material constants and microwave absorbing characteristics of ferroxplana composite microwave absorber used in X-band was investigated.

The real part of permeability(μ_r') was decreased and the imaginary part of permeability(μ_r'') of ferroxplana composite was increased with increasing ferroxplana loading ratio(F/R). The frequency showing maximum attenuation was shifted to lower frequency with increasing absorber thickness. The absorber 2.6mm thick showed good band width property and 3.2mm thick showed good attenuation property. From the application of ferroxplana composite's material constants to the region of material constants which satisfy broad band width, it is found that the absorbing characteristics were estimated quantitatively. Establishment of material constants' region which satisfies broad band width can make practical application to design of high performance ferrite microwave absorber.