

복합 Ferrite 전파흡수체의 설계방안

신재영 · 오재희

인하대학교 무기재료공학과
(1993년 7월 14일 접수)

Design of Ferrite Composite Microwave Absorber

Jae-Young Shin and Jae-Hee Oh

Department of Ceramic Engineering, Inha University
(Received July 14, 1993)

요 약

정합조건 graph는 대역폭에 관련된 정량적인 자료를 제공하지 못하기 때문에 광대역 전파흡수체의 설계방안으로는 부족하다. 따라서 1층형 광대역 전파흡수체를 설계하기 위해서는 새로운 방법이 필요하다. 본 연구에서는 C-X band에서의 1층형 광대역 전파흡수체를 설계하기 위한 복소투자율의 영역을 연구하였으며 그 응용성을 검토하였다. 복소투자율영역은 응용주파수영역에서 복소투자율의 주파수의존성을 제공하기 때문에 광대역 전파흡수체의 설계에 효과적으로 이용될 수 있음을 확인하였다. 이러한 복소투자율영역은 흡수체의 유전손실항, 응용주파수영역 그리고 허용반사감쇠량이 변하는 경우 대역폭에 관련된 복소투자율값을 제공하기 때문에 광대역 전파흡수체의 설계에 유용하다.

ABSTRACT

The impedance matching solution map is not a sufficient method for designing the broad-band absorber because of its difficulty to get numerical data about practical band-width. Therefore, we develop a new method to design the broad-band absorber. The complex permeability limits, which is necessary for designing the broad-band absorber in C-X band (4 GHz~12.4 GHz) were investigated and application was also examined. The complex permeability limits represent the frequency dependence of the complex permeability at a practical frequency band. These complex permeability limits can be used effectively to design broad-band single-layered absorber because they offer numerical data about the band-width in the case of various dielectric loss tangent, practical frequency bands and permitted reflection losses of an absorber.

1. 서 론

전파흡수체는 불필요한 전자파를 흡수하여 특징적 이하의 전자파만을 반사하도록 설계된 재료로서 재료의 손실에 따라 도전손실체, 유전손실체 그리고 자성손실체 등으로 구성된다. 이중 자성손실을 이용한 전파흡수체는 다른 손실을 이용한 전파흡수체보다 성능이 우수하여 널리 이용되고 있으며 자성손실체로는 일반적으로 ferrite를 이용한다.

이와같은 ferrite 전파흡수체는 사용되는 주파수영역에 따라 소결형과 복합형으로 나눌 수 있으며 복합 ferrite 전파흡수체는 GHz대역에서 전파흡수능이 우수하여 mi-

crowave-용 전파흡수체로서 사용되어지고 있다¹⁾.

복합 ferrite 전파흡수체의 성능은 정합주파수(matching frequency), 정합두께(matching thickness) 그리고 대역폭(band width) 등으로 평가되며^{1,2)} 일반적으로 고성능 전파흡수체란 두께가 얇으며 대역폭이 우수한 특성을 갖는다.

금속판을 뒷면에 붙인 1층형 전파흡수체의 설계방안은 impedance matching 기법을 이용한 정합조건 graph(impedance matching solution map)이며 정합조건 graph를 이용하는 방법은 응용하고자 하는 재료의 재료정수(복소투자율, 복소유전율)를 정합조건 graph에 적용시켜 정합조건을 만족하는지를 판단하는 것이다³⁾. 이때 정

합조건을 만족한다면 정합주파수 및 정합두께를 예측할 수 있다. 그러나 정합조건 graph로는 응용하는 재료의 특정반사감쇠량 이상이 얻어지는 주파수영역, 즉 대역폭을 예측할 수 없으며 또한 특정 주파수영역에서 10 dB 또는 20 dB 이상의 반사감쇠량이 얻어지는 전파흡수체를 제조하고자 할 때 요구되는 재료정수를 정량적으로 알 수 없는 단점이 있다. 따라서 광대역 전파흡수체의 설계지침으로는 활용하기가 부족하다.

이와 같은 문제점을 근본적으로 해결하기 위하여 본 연구에서는 광대역 전파흡수체를 설계하기 위한 설계지침으로 특정 주파수영역에서 특정 반사 감쇠량 이상이 얻어지는 복소투자율 영역을 제시하고 이를 1층형 광대역 전파흡수체의 설계지침으로 활용하고자 하였다. 설계대상인 주파수영역은 일반적으로 복합 ferrite 전파흡수체가 이용되는 C-X band(4~12.4 GHz)이며 허용 반사감쇠량은 10 dB와 20 dB를 설정하여 광대역 전파흡수체가 요구하는 재료정수 영역을 설정하였다.

2. 실험방법

본 연구에서 제시한 설계방안에 적용시킨 복합 ferrite 전파흡수체의 제조방법은 다음과 같다. 시약급인 출발물질(NiO, ZnO, Co₃O₄, Fe₂O₃)을 나일론볼과 플라스틱 통을 이용하여 10시간 동안 습식혼합한 후 80°C에서 24시간 이상 건조하였다. 건조한 출발물질을 muffle furnace내에서 공기분위기로 1300°C, 3시간 열처리하여 Ni-Zn-Co ferrite를 합성하였다. Table 1에 본 연구에 사용한 Ni-Zn-Co ferrite의 조성을 나타내었다.

합성한 ferrite를 자당마노유발에서 2시간 분쇄한 후 ferrite 분말과 silicone 고무를 혼합하여 외경 7 mm, 내경 3 mm인 toroid형 복합 ferrite 시편을 제조하였다. 이때 ferrite-rubber 복합체는 복합체내의 ferrite 함량이 크며 flexibility가 양호한 조건인 ferrite의 무게/고무의 무게= 4로 하였다.

4 GHz~15 GHz에서의 복합 ferrite 시편의 재료정수를 구하기 위하여 HP8720B Network Analyzer를 이용하여 S-parameter를 측정하고, S-parameter에 의하여 복소투자율($\mu' - j\mu''$)과 복소유전율($\epsilon' - j\epsilon''$)을 계산하였다⁵⁾. 또한 측정된 재료정수에 의하여 복합 ferrite 시편의 반사감쇠량(dB)을 계산하였다

3. 결과 및 고찰

금속판을 뒷면에 붙인 1층형 전파흡수체가 수직입사된

Table 1. The Ferrite Composition in This Study (w/o)

Fe ₂ O ₃	NiO	ZnO	Co ₃ O ₄
67.3%	15.1%	10.9%	6.7%

전자파를 완전히 흡수하기 위한 정합조건은 다음의 식 (1)과 같다^{1,2)}.

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

여기서 Z는 규격화 입력임피던스, μ_r 는 복소투자율($\mu' - j\mu''$), ϵ_r 은 복소유전율($\epsilon' - j\epsilon''$), C는 공기중의 광속, f는 주파수 그리고 d는 흡수체의 두께이다. 식 (1)의 결과와 같이 전파흡수체가 정합조건을 만족하기 위해서는 규격화 입력임피던스가 1이 되어야 하며 이때의 변수는 μ' , μ'' , ϵ' , ϵ'' , f 그리고 d 등 6가지이다. 식 (1)의 풀이는 유전손실을 고려한 복소유전율항과 f·d항을 일정한 값으로 고정시킨 후 Z가 1일 때의 복소투자율항을 계산한다. 일련의 유전율항과 f·d항에 대하여 Z가 1을 만족할 때의 복소투자율값을 계산하여 그림으로 나타낸 것이 정합조건 graph이다.

정합조건 graph는 정합조건을 만족할 때의 복소투자율을 나타낸 것이기 때문에 응용하고자 하는 재료의 정합조건과의 일치여부 그리고 정합조건을 만족한다면 이때의 f·d항을 알 수 있으므로 정합주파수 및 정합두께의 예측이 가능하다. 그리고 정합조건을 만족할 때의 재료정수를 알 수 있기 때문에 이를 만족하는 흡수체를 구성한다면 원하는 주파수에서 정합조건을 만족하는 전파흡수체의 제조가 가능하다. 그러나 정합조건 graph로는 특정 반사감쇠량이 얻어지는 주파수영역을 예측하기가 어려우며 또한 특정 주파수영역에서 10 dB 또는 20 dB 이상의 반사감쇠량이 얻어지는 전파흡수체를 설계하고자 할 때 필요한 재료정수를 정량적으로 알 수 없는 단점이 있어 광대역 전파흡수체의 설계방안으로 활용하기가 부족하다

응용하고자 하는 주파수대역에서 1층형 전파흡수체가 정합이 되기 위해서는 넓은 주파수영역에서의 재료정수가 정합조건에 맞는 특정값을 가져야만 한다. 그러나 1층형 전파흡수체가 넓은 주파수영역에서 정합조건을 만족하는 재료정수를 갖기란 불가능하기 때문에 사용하고 자 하는 주파수영역에서 특정 반사감쇠량이상의 흡수능을 갖는 재료정수영역을 설정하고 이를 사용자가 이용할 수 있도록 도식화하는 작업이 1층형 광대역 전파흡수체의 설계에 필요하다.

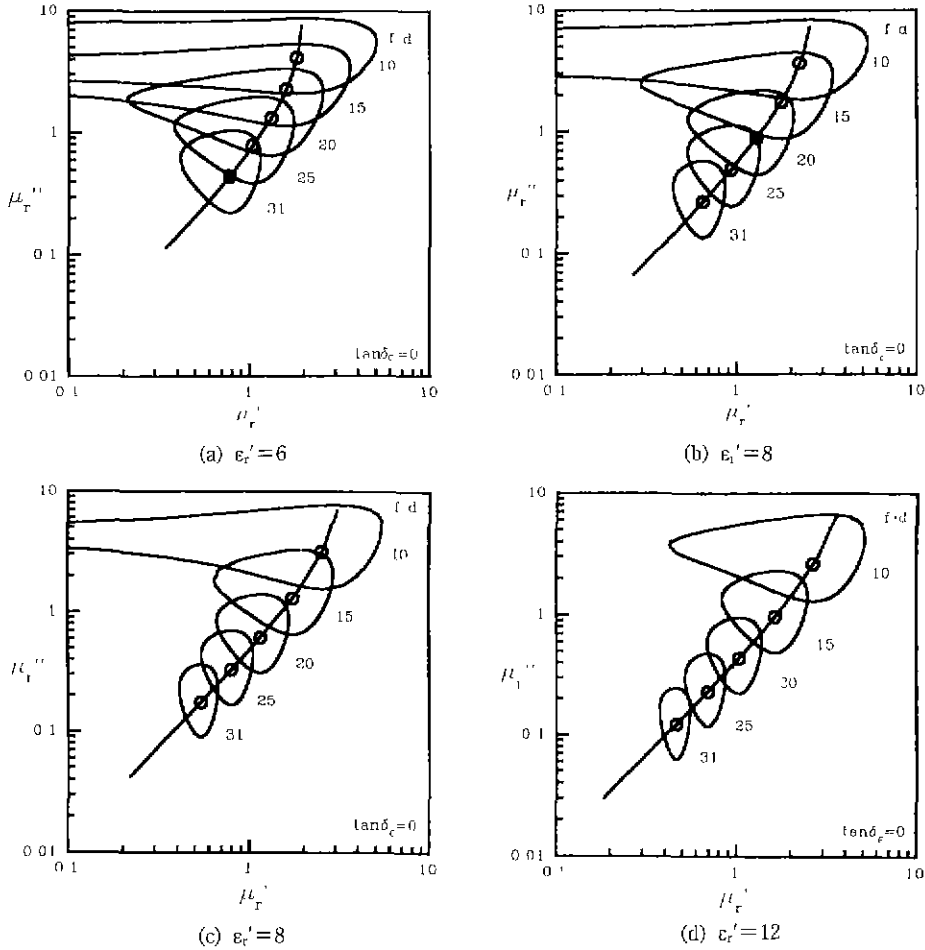


Fig. 1. 10 dB limits with various ϵ_r' .
 —: matching line
 ○: matching point at different $f \cdot d$ values
 □: 10 dB limits at different $f \cdot d$ values

Fig. 1에 1층형 ferrite 전파흡수체가 C-X band(4~12.4 GHz)에서 10 dB 이상의 반사감쇠량을 갖기 위한 복소 투자율영역을 도식화하여 나타내었다. Fig. 1은 유전손실 항이 0($\tan\delta_c=0$)이고 ϵ_r' 을 6~12 범위로 변화시켰을 때, 두께 2.5 mm인 1층형 ferrite 전파흡수체가 4~12.4 GHz인 주파수대역에서 정합조건을 만족할 때의 복소 투자율값과 $f \cdot d$ (GHz·mm)값 그리고 10 dB 이상의 반사감쇠량을 갖는 복소투자율의 영역을 의미한다. 여기서 $f \cdot d$ 항을 10~31 GHz·mm로 한정된 것은 C-X band의 시작주파수인 4 GHz, 중간주파수인 6, 8, 10 GHz와 마지막주파수인 12.4 GHz를 두께 2.5 mm로 곱한 항으로 나타내었기 때문이며 ferrite 전파흡수체의 유전손실은 미

소하므로 유전손실항인 $\tan\delta_c$ 은 0으로 설정하였다.

Fig. 1을 고찰하여 보면 ϵ_r' 이 증가함에 따라 10 dB 이상의 반사감쇠량을 갖기 위한 투자율의 허수항과 실수항은 점차 감소함을 알 수 있다. 예를들면, ϵ_r' 이 6, 8, 10, 그리고 12로 증가함에 따라 31 GHz·mm에서 10 dB 이상의 반사감쇠량을 갖기 위한 μ_r'' 은 각각 0.2~1, 0.14~0.6, 0.09~0.4, 0.06~0.25의 범위로 감소하고 μ_r' 은 각각 0.41~1.16, 0.44~0.86, 0.41~0.68, 0.37~0.55의 범위로 감소한다. 따라서 광대역 전파흡수체를 제조하기 위해서는 ϵ_r' 을 감소시키는 것이 유리하다고 판단된다.

만일 설계하고자하는 전파흡수체의 응용주파수대역과 두께를 다르게 설정하고자 한다면 이에 맞는 $f \cdot d$ 항을

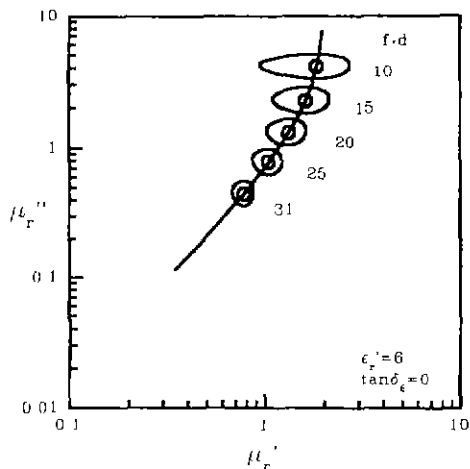


Fig. 2. 20 dB limits in the case of $\epsilon_r'=6$ and $\tan\delta_c=0$.

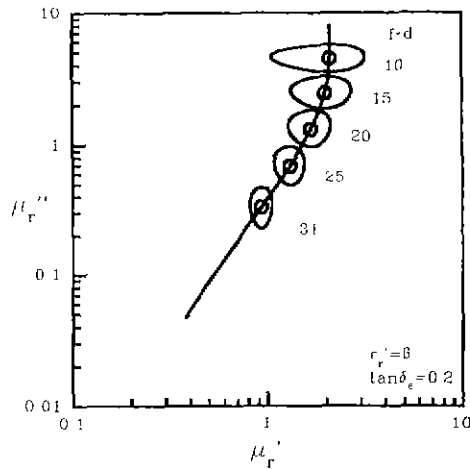


Fig. 3. 20 dB limits in the case of $\tan\delta_c=0.2$.

설정하고 10 dB 이상의 반사감쇠량을 갖는 복소투자율을 계산하여 Fig. 1과 같이 나타내면 된다.

1층형 광대역 전파흡수체를 설계하고자 할 때 허용하는 반사감쇠량을 20 dB로 하면 보다 정합조건에 근접해야 하기 때문에 10 dB인 경우에 비하여 복소투자율영역이 작아진다.

Fig. 2에 $\epsilon_r'=6$, 두께가 2.5 mm인 1층형 전파흡수체가 C-X band에서 20 dB이상의 반사감쇠량을 갖기 위한 복소투자율영역을 나타내었다. Fig. 1(a)에 나타난 10 dB 이상의 반사감쇠량을 갖기 위한 복소투자율영역에 비하여 현저히 작은 영역임을 알 수 있다.

Fig. 1과 Fig. 2에서 고찰한 설계방안에서는 응용하고자 하는 재료의 유전율허수항이 0인 경우, 즉 $\tan\delta_c=0$ 인 경우에 해당되며 만일 응용하고자 하는 재료의 유전율허수항이 무시할 수 없을 정도로 크다면 유전율허수항을 고려하여 광대역 전파흡수체를 설계하여야 한다.

Fig. 3에 $\tan\delta_c=0.2$ 이고, $\epsilon_r'=6$, 두께가 2.5 mm인 1층형 전파흡수체가 C-X band에서 20 dB이상의 반사감쇠량을 갖기 위한 복소투자율영역을 나타내었다. Fig. 2에 제시한 결과와 비교하여 보면 유전율허수항이 증가함에 따라서 20 dB 이상의 반사감쇠량을 갖는 복소투자율 범위가 증가한다. 예를들면 유전손실항이 0에서 0.2로 증가함에 따라서 10 GHz·mm에서 20 dB 이상의 반사감쇠량을 갖기 위한 μ_r'' 의 범위는 3.3~5.1에서 3.5~5.7로, μ_r' 의 범위는 0.95~2.7에서 1.1~3.2로 증가한다.

이와같이 Fig. 1~Fig. 3에서 제시한 설계방안은 기존의 정합조건만을 나타낸 정합조건 graph와는 달리 정합조건을 만족하는 경우와 특정 반사감쇠량 이상을 나타내는

복소투자율항을 정량적으로 나타낼 수 있다. 그리고 설계하고자 하는 전파흡수체의 두께, 주파수범위, 유전손실항 그리고 허용하는 반사감쇠량 등 설계인자의 변화에 따라서 이에 해당되는 복소투자율항을 정량적으로 나타낼 수 있기 때문에 1층형 광대역 전파흡수체를 설계하는데 효과적으로 이용될 수 있다.

Fig. 1~Fig. 3에서 제시한 복소투자율영역이 1층형 광대역전파흡수체의 설계방안으로 활용가능성이 있는지를 검토하고자 C-X band에서 전파흡수능이 우수한 복합 Ni-Zn-Co ferrite 전파흡수체의 재료정수를 본 연구에서 제시한 설계방안에 적용시키고 그 결과를 고찰하였다.

본 연구에 사용된 복합 ferrite 전파흡수체의 복소투자율을 Fig. 4에 나타내었다. 본 실험에서 지지재로 사용한 silicone 고무의 재료정수는 예비실험을 통하여 4 GHz~15 GHz에서 $\mu_r'=1$, $\mu_r''=0$, $\epsilon_r'=2.8$, $\epsilon_r''=0$ 임을 확인하였으며 이러한 결과로부터 silicone 고무는 자성손실 및 유전손실이 없음을 알 수 있었다.

Fig. 4를 고찰하면 4 GHz~15 GHz에서의 복합 ferrite 전파흡수체의 복소투자율은 주파수변화에 따라서 크게 변화하고 있음을 알 수 있다. Ferrite 전파흡수체는 자성손실을 이용한 것으로서 자성손실은 공명현상에 의하여 주로 발생한다. Ferrite는 공명현상 이후에 투자율의 실수항과 허수항이 모두 감소한다⁶⁾. Fig. 4에서 고찰할 수 있듯이 측정주파수인 4 GHz~15 GHz에서 주파수가 증가함에 따라 투자율의 실수항 및 허수항이 모두 감소하는 현상으로 보아 4 GHz~15 GHz는 복합 ferrite 전파흡수체의 공명주파수 이후의 영역이라 판단된다.

복합 ferrite 전파흡수체의 복소유전율은 복소투자율

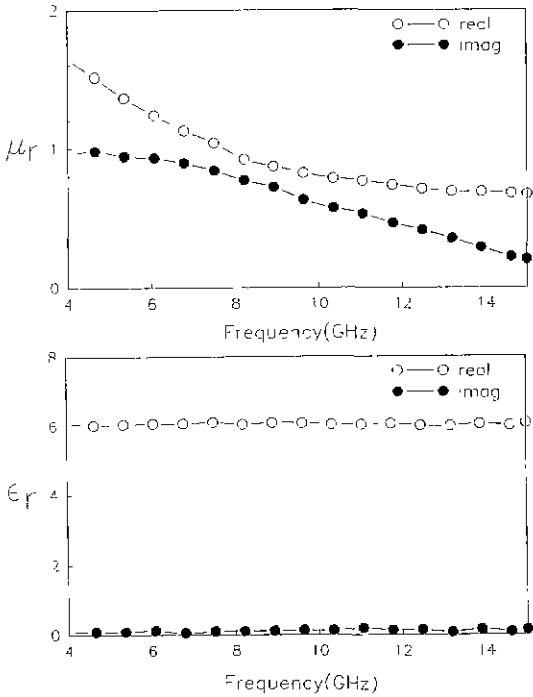


Fig. 4. Material constants spectra of ferrite composite.

피는 달리 주파수변화에 관계없이 실수항은 약 6.0, 허수항은 약 0에 가까운 값을 갖음을 알 수 있었다.

이와같은 재료정수를 갖는 복합 ferrite 전파흡수체의 전파흡수능을 고찰하기 위하여 주파수변화에 따른 반사감쇠량(dB)을 계산하였다. 금속판을 뒷면에 붙인 1층형 전파흡수체의 반사감쇠량(dB)은 다음 식 (2)에 의하여 계산이 가능하다⁷⁾

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

식 (2)에서 Z는 식 (1)로 정의되는 규격화 입력 임피던스이다. 주파수변화에 따른 복합 ferrite 전파흡수체의 규격화 입력 임피던스를 식 (1)에 의하여 구하고, 식 (2)에 의하여 주파수변화에 따른 반사감쇠량(dB)을 계산하였다.

Fig. 5에 두께가 2.5 mm인 복합 ferrite 전파흡수체의 계산된 전파흡수능을 나타내었다. Fig. 5를 고찰하여 보면 복합 ferrite 전파흡수체는 두께가 2.5 mm일 때 13.6 GHz에서 정합이 발생함을 알 수 있다. 그리고 7 GHz 이상의 주파수범위에서 10 dB 이상의 반사감쇠량을 나타냄을 확인하였다.

이와같은 반사감쇠량을 갖는 복합 ferrite 전파흡수체

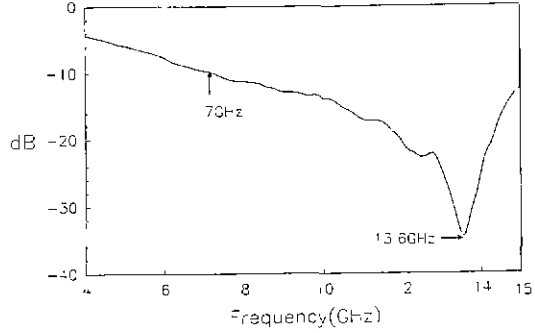


Fig. 5. Calculated reflection loss of ferrite composite (d=2.5 mm).

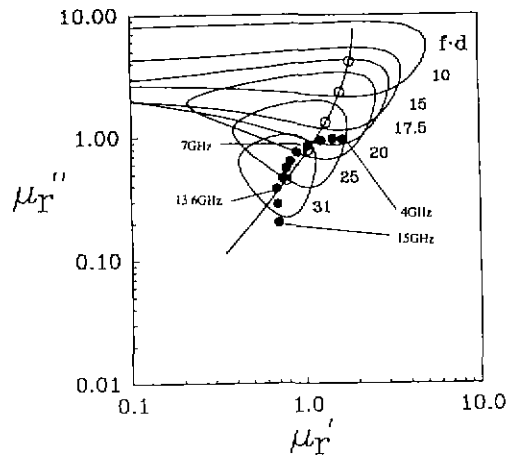


Fig. 6. The $\mu_r' - \mu_r''$ locus of ferrite composite on 10 dB limits.

- : $\mu_r' - \mu_r''$ locus of ferrite composite
- : matching line
- : matching point at different f·d values
- : 10 dB limits at different f·d values

의 재료정수를 본 연구에서 제시한 10 dB 이상의 반사감쇠량을 갖기 위한 복소투자율 영역에 적용시키고 그 결과를 고찰하였다.

Fig. 6에 유전율 실수항이 6이고 $\tan \delta_c$ 이 0인 ferrite 전파흡수체가 4GHz~12.4 GHz에서 10 dB 이상의 반사감쇠량을 갖기 위한 복소투자율 영역과 복합 ferrite 전파흡수체의 복소투자율을 적용시킨 결과를 나타내었다.

복합 ferrite 전파흡수체의 복소투자율 궤적을 살펴보면 정합조건을 만족하는 복소투자율선과 교차하는 점이 있음을 알 수 있으며 이때의 주파수가 13.6 GHz이어서 정합주파수는 13.6 GHz임을 알 수 있다. 그리고 10 dB 이상의 반사감쇠량을 갖는 복소투자율영역에 해당되는

복소투자율 계적의 주파수범위가 7 GHz 이상임을 알 수 있어 해당되는 주파수영역에서 복합 ferrite 전파흡수체가 10 dB 이상의 반사감쇠량을 갖음을 정량적으로 예측이 가능하다. 이와같은 결과를 Fig. 5에서 고찰한 전파흡수능결과와 비교하면 정합조건 및 10 dB 이상의 반사감쇠량을 갖는 주파수범위가 일치한다.

이와같이 Fig. 1~Fig. 3에 나타낸 복소투자율영역에 ferrite 전파흡수체의 복소투자율 계적을 적용시킴으로서 우리는 보다 향상된 전파흡수능을 갖기 위한 자료를 알 수 있는데 즉, 정합주파수를 낮은 주파수로 이동시킨다면 이때에 요구되는 복소투자율값 그리고 보다 넓은 대역폭을 갖기 위한 복소투자율값 또는 20 dB를 대역폭의 기준으로 하였을 때 요구되는 복소투자율값 등을 정량적으로 알 수 있어 광대역전파흡수체의 설계에 유용하게 이용될 수 있으리라 판단된다.

4. 결 론

1층형 광대역 전파흡수체를 설계하기 위한 기본지침을 마련하기 위하여 본 연구에서는 특정 반사감쇠량이상을 나타내는 복소투자율영역을 제시하고 이를 일반화하기 위한 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) C-X band(4 GHz~12.4 GHz)용 1층형 광대역 전파흡수체를 설계하기 위한 복소투자율영역을 제시하였다.

2) 본 연구에서 제시한 설계방안은 설계하고자 하는 전파흡수체의 두께, 주파수범위, 유전손실항 그리고 허

용하는 반사감쇠량 등 설계인자의 변화에 따라서 정합조건과 특정 반사감쇠량이상을 나타내는 복소투자율항을 정량적으로 나타낼 수 있어 1층형 광대역 전파흡수체를 설계하는데 효과적으로 이용될 수 있다.

3) 복합 ferrite 전파흡수체의 재료정수를 새로운 설계방안에 적용하여 정합주파수와 대역폭 등의 전파흡수 특성을 정량적으로 고찰할 수 있었다.

REFERENCES

1. 内藤喜之, "電波吸收體," *オーム*, 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.*, **MTT-19**(1), 65-72 (1971).
3. H.M. Musal, Jr. and H.T. Hahn, "Thin-Layer Electromagnetic Absorber Design," *IEEE Trans. Mag.*, **25**(5), 3851-3853 (1989).
4. 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).
5. W.B. Weir, "Automatic Measurement of Complex Dielectric Constant and Permeability at Microwave Frequencies," *Proc. IEEE*, **62**(1), 33-36 (1974).
6. J. Smit and H.P.J. Wijn, "Ferrites," Philips's Technical Library. 268-300 (1959).
7. 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).