

## 복합재료를 이용한 1.9 GHz용 전자파흡수체 설계 (I)

최 형 도·김 왕 섭\*·전 인 수\*·문 탁 진†

고려대학교 재료공학과, \*보성중전기 주식회사

(1996년 3월 27일 접수)

### A Design of the Electromagnetic Wave Absorber at 1.9 GHz Using Composites (I)

Hyung Do Choi, Wang Sup Kim\*, In Soo Jeon\*, and Tak Jin Moon†

Dept. of Materials Science, Korea University, Seoul 136-701, Korea

\*Bo Sung Electric Co., 529-10, Sinsa-Dong, KangNam-Gu, Seoul C.P.O.Box 103, Seoul, Korea

(Received March 27, 1996)

요약: 1.9 GHz에서 20 dB이상의 전자파 흡수능을 갖는 전자파 흡수체에 대한 설계 방법에 대하여 연구하였다. 실제 실험을 통해 얻은 복합재료의 조성을 기초로 하여 이 복합재료의 전자파 흡수능을 향상시킬 수 있는 방안을 마련하였다. 즉 고정된 복소 투자율에 대한 유전율 실수부 및 허수부가 전자파 흡수능에 미치는 영향을 고찰하였다. 또한 제조시 발생할 수 있는 치수 및 물성의 편차를 고려하여 이들의 허용범위를 설계조건에 제시하였다.

ABSTRACT: A designing method of an electromagnetic wave absorber exhibiting over 20 dB attenuation at 1.9 GHz was investigated. Based on the composite compositions attained from the experimental works, the possible ways in which improving the attenuation ability were simulated. That is, in a fixed complex permeability the effects of the real and imaginary part of the complex permittivity on the attenuation ability were studied. In regarding the dimensional and property variances which could be occurred during the fabrication process, their allowances were also given in the design condition.

Keywords: design, electromagnetic wave absorber.

#### 서 론

전자, 통신기기의 발달과 대량보급에 의해 전자파의 사용량이 증가되고 이에 따른 전자파 공해가 고품질의 전자파 환경 조성에 장애물이 되고 있고 이런 전자파 공해가 사회적으로 큰 관심을 끌고 있다. 전자파 공해로 인한 문제들을 최소화시키기 위한 노력의 하나로써 제시되는 것이 전자파 흡수체이다. 전자파 흡수체의 흡수능에 영향을 미치는 변수는 재료의 기본 물성(복소투자율 및 복소유전율), 주파수 및 두께 등으로 흡수특성을 조절함에 있어서 이들 변수

의 영향을 고려해야만 한다. 따라서 이들 변수에 대한 영향을 고려한 설계방안을 제시하고자 하는 노력이 행해져 왔다.<sup>1,2</sup> 특히 Kim 등은<sup>3</sup> 이론식을 대수적으로 풀고 완전정합점의 개념 대신 실제 발생할 수 있는 오차를 감안한 정합범위의 개념을 도입하는 시도로 설계의 실용성을 향상시켰다. 그러나 설계의 대상이 주로 소결체 페라이트에 대한 것으로 소결체 페라이트의 제조 및 특성상의 한계에 대한 대안으로 복합재료를 사용할 경우 이에 대한 설계 방안이 제시되지 않았다. 또한 실제 전자파 흡수체를 구현함에 있어서 구현시킬 재료의 물성을 고려하지 않아, 적용상

에 한계점이 있다. 한편 자성손실과 유전손실을 함께 이용하는 전자파 흡수체의 경우, 복소유전율의 허수부가 전자파 흡수능에 영향을 줄 수 있기 때문에 이 변수에 대한 고찰이 필요하다.

그러므로 본 연구에서는 최근 이동통신에서 관심을 갖는 주파수 1.9 GHz에 대한 전자파 흡수체를 구현하고자 하는 노력의 일환으로 두 종류 이상의 충전체가 첨가된 복합재료를 이용한 전자파 흡수체의 설계를 시도하였다. 전편의<sup>4</sup> 실험을 통해 얻은 복합재료에 제 2의 충전체를 분산시켜 가능한 재료를 얇게 하고 전자파 흡수능을 향상시키는 방안을 제시하였고, 설계의 변수는 유전율의 실수값과 허수값 및 두께이며, 이들의 영향을 고려하였다. 이때 복소투자율값은 특정 주파수에서 일정한 값으로 고정하였다. 또한 실제 제조시 발생할 수 있는 물성의 편차를 고려한 설계조건을 제시하였다.

### 전자파 흡수체 설계

일반적인 전자파 흡수체는 Fig. 1과 같이 전자파 흡수재료의 이면에 금속판을 부착시킨 구조로 사용되는데 이런 경우 평면파가 수직 입사할 때 전면의 입력 임피던스는 자유공간의 임피던스  $Z_0$ 로 규격화하였을 경우

$$Z = \frac{Z_{input}}{Z_0} = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tanh \left[ i \frac{2\pi}{c} \sqrt{\mu_r \epsilon_r} f \cdot d \right] \quad (1)$$

된다. 여기서  $c$ 는 광속,  $f$ 는 주파수,  $d$ 는 재료의 두께이며  $\mu_r$ 과  $\epsilon_r$ 는 각각 재료의 비복소 투자율과 유전율이다. 이때 전자파 감쇠량은 다음과 같이 표현된다.

$$Attenuation(dB) = 20 \cdot \log \left| \frac{z-1}{z+1} \right| \quad (2)$$

식 (1)과 (2)에서 알 수 있듯이 입력단의 규격화 임피던스값이 1이 되면 무한대의 감쇠가 발생하여 반사가 전혀 일어나지 않은 조건이 되는데 이를 완전 정합이라 한다. 그러나 실용상으로는 입력된 전자파가 99% 혹은 90% 감쇠되는 20, 10 dB를 한계로

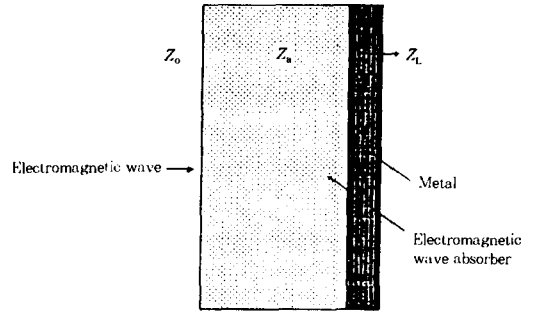


Figure 1. Schematic configuration of electromagnetic wave absorber.

Table 1. Experimental Composition (wt%)

raw material	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZnO	NiO
Ni-Zn ferrite	68.2	13.03	18.77

하고 있다. Kim은<sup>5</sup> 식 (1)과 (2)를 이용하여 전자파 흡수체를 설계하는 방법을 제시한 바 있어 이를 사용하여 1.9 GHz용 20 dB이상의 전자파 흡수능을 갖는 전자파 흡수체를 설계하였다.

### 실 험

본 실험에서 제작된 에폭시-페라이트 복합재료의 고분자 지지재료로는 cresol novolac epoxy resin (ESCN 195-6, 일본 스미토모화학)을 사용하였다. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, NiO, ZnO(Aldrich, 99%)를 Table 1과 같이 평량하여 원료와 에탄올 및 석粉的 무게비를 1:2:3으로 하여 24시간 혼합한 후 전기 건조기에서 10시간 건조시켰다. 건조된 시료를 box형 furnace에서 분당 5 °C씩 승온하고 900 °C에서 2시간 유지시켜 열처리한 후 재분쇄하여 페라이트 분말을 만들었다.

이렇게 만들어진 페라이트 분말을 270, 325 mesh에 차례로 통과시켜 입자크기를 44-53 μm사이로 조절하였다. 페라이트 분말의 표면은 실란계 결합제인 A-187 (γ-glycidoxypropyl trimethoxysilane, Union Carbide사)을 1 wt% 첨가하여 처리한 후 이것을 35, 40, 50, 60 vol%로 에폭시에 첨가하여 혼합하였다. 이때 경화제는 phenol novolac resin (Tamanol 758, 일본 아카리와사)을 사용하였다. 측정시편은 압축성형하여 원판형, 토로이달형, 동축형으로 성형한

후 180 °C에서 5시간 유지시켜 경화시켰다. 에폭시-페라이트 복합재료의 시편은 각 조성당 각각의 형태로 3개씩 제작하였다. 토로이달형 시편에 직경 0.35 mm의 에나멜선을 균일한 간격으로 20회 감고 impedance/gain phase analyzer (HP 4194A)를 사용하여 1 MHz-40 MHz의 주파수범위에서 inductance와  $Q(\mu' / \mu'')$ 를 측정하여 복소투자율을 구하였다. 50 MHz-5 GHz까지의 특성은 동축형 시편을 coaxial air line (HP85051-60007)에 삽입한 후 network analyzer (HP8753C)를 사용하여 복소투자율을 구하였다.<sup>6</sup>

결과 및 고찰

1.9 GHz용 전자파 흡수체를 구현함에 있어 20 dB 즉 99.9%의 흡수능을 가지는 재료의 설계를 하고자 했다. Fig. 2는 에폭시에 페라이트를 35, 40, 50, 60 vol%로 첨가한 복합재료의 기본 물성을 나타낸 것이다. 그림과 같은 물성을 나타내는 복합재료의 조성(즉 페라이트 소결체의 조성과 페라이트 함량)을 토대로 하여 전자파 흡수능을 향상시킬 수 있는 방안을 모색하고자 설계를 하였다. Fig. 2에 나타낸 복합재료로 전자파 흡수체를 구현할 경우 전편의<sup>4</sup> 결과에서 알 수 있듯이 1.9 GHz에서 약 10 dB정도의 감쇠효과를 나타내었다. 본 논문에서는 감쇠효과를 향상시킬 수 있는 방안을 설계를 통해 조사하였다. 전자파 흡수 특성은 재료의 기본 물성 즉 재료가 갖는 복소투자율 및 복소유전율 그리고 복합재료의 두께 등에 의해 영향을 받는다. 그러므로 복합재료의 기본 조성을 본 실험을 통해 얻은 페라이트 함량을 고정시킬 경우, 자성체의 함량이 고정되기 때문에 복소투자율의 값을 고정시킬 수 있었다. 여기에 복합재료에 소량의 유전체를 첨가시키므로 복소유전율만 변화시켜 전자파 흡수 특성을 향상시킬 수 있으리라 기대되고, 이런 발상에 근거하여 설계를 하였다.

Fig. 3과 4는 1.9 GHz에서 정합범위의 중심좌표에 해당하는 완전정합점의 비투자율 실수값과 허수값이 비유전율과 두께에 따라 변하는 경향을 나타낸 것이다. 각각의 실선들은 20 dB이상의 감쇠를 나타낸다. Fig. 3에서 완전정합점의 비투자율 실수값이 유전율에 따라 변화하는 양상을 살펴보면, 두께가 증가

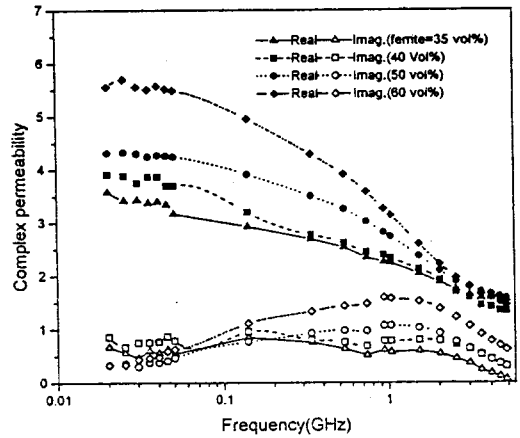


Figure 2. Complex permeability spectra of the composite for Various ferrite volume fraction.

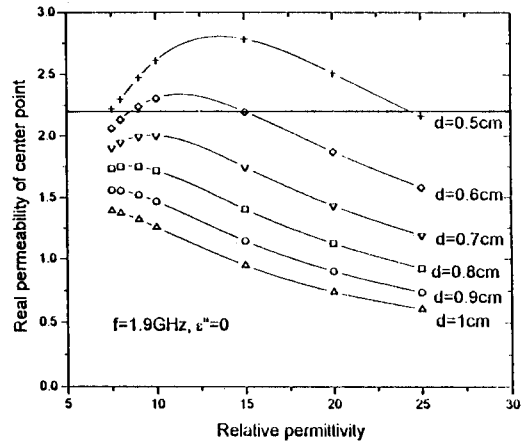
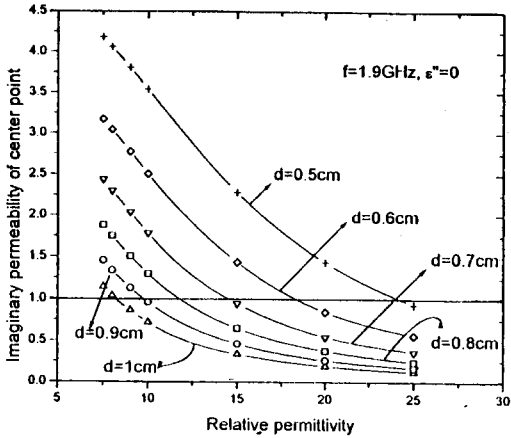
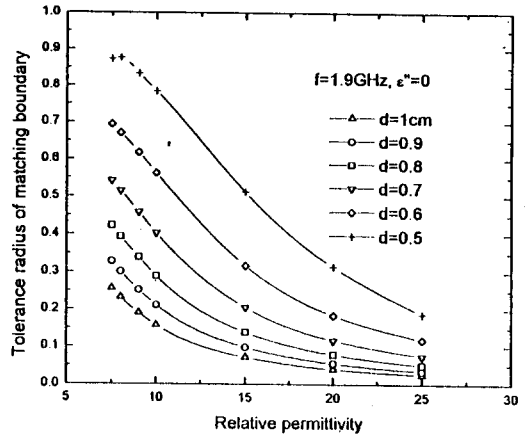


Figure 3. Relationship between the  $\mu'$  and  $\epsilon'$  at the center point of matching boundary with different thickness.

함에 따라 투자율 실수부는 어떤 유전율까지는 증가하다가 감소하는 경향을 나타내며 이들의 최대값을 나타내는 유전율은 두께가 증가함에 따라 감소하였다. 반면 Fig. 4에서 비투자율의 허수값은 유전율이 증가함에 따라 전 두께에 대해 모두 감소하였다. Fig. 1을 보면 페라이트 함량이 50 vol%인 복합재료는 1.9 GHz에서 복합재료의 투자율 실수부가 2.2이고 허수부가 1정도의 값을 가지므로 이 복합재료에 유전체를 첨가하여 정합조건을 만족하는 복소유전율



**Figure 4.** Relationship between the  $\mu''$  and  $\epsilon''$  at the center point of matching boundary with different thickness.



**Figure 5.** Relationship between the tolerance radius of matching boundaries and the  $\epsilon'$  with different thickness.

값을 찾아야 한다. 먼저, 유전율 실수값을 변화시킬 경우 두께가 0.6 cm이하에서 투자율 실수부를 만족시키는 유전율이 나타나고, 반면 투자율 허수값을 보면 허수값이 1인 경우는 어느 두께든지 만족하는 유전율값이 존재하는 것을 알 수 있었다. 그러므로 실수값과 허수값을 동시에 만족시키는 것은 유전율이 25이고 두께가 0.5 cm인 경우가 가장 잘 만족되는 것을 알았다. 그러나 현실적으로 실제 재료를 구현함에 있어서 1.9 GHz에서 유전율이 25 정도의 값을 가지면 본 설계에서 고정시킨 유전율 허수값이 0이 되는 경우의 재료를 구현하기는 거의 불가능하다고 할 수 있다. 그러므로 완전 정합점의 재료를 구현하기 보다는 정합점에 가까운 값을 갖는 재료를 선택해야 하며, 보다 낮은 유전율값을 갖는 재료로 구현시킬 방안을 마련해야 할 것이다. 따라서 설계의 개념을 정합범위로서 생각하고, 정합범위의 크기가 가장 큰 경우를 선택하여 실현 가능한 재료를 찾는 방법을 시도하였다. Fig. 5는 정합범위의 반지름에 해당하는 허용오차가 두께와 유전율에 따라 어떻게 변하는가를 나타낸 것이다. 허용오차는 유전율과 두께가 증가할수록 감소함을 알 수 있었다. 유전율이 커지면 허용오차가 감소하므로 정합범위를 감소하게 되므로 만일 유전율 25이고 두께가 0.5 cm인 경우, 허용오차가 약 0.2정도의 값을 가지므로 정합범위가 상당히 작게 된다. 실제 유전율 허수값이 0인 재료가 구현되었다

하더라도 이를 만족시키는 정합범위가 상당히 작으므로 이 정합범위내에 재료를 구현하는데는 상당한 노력과 정밀도가 요구될 것이다. 그러므로 허용오차를 고려하여 유전율 10이하의 경우 정합범위에 근접한 값을 갖는 유전율과 두께를 선정하고, 유전율 실수값의 변화만으로는 지금까지의 설계로 미루어 불가능하기 때문에 유전율 허수값을 변화시켜 정합범위를 만족하는 값을 찾았다. Fig. 6은 1.9 GHz에서 두께가 0.8 cm인 유전율 실수값이 10인 경우, 유전율 허수값의 변화에 정합범위를 나타낸 것이다. 유전율 허수값이 증가함에 따라 정합범위의 중심 즉 완전 정합점은 투자율 실수값은 커지고, 허수값은 작아지는 방향으로 이동하였다. 또한 정합범위의 반지름 즉 허용오차는 유전율 허수값이 증가함에 따라 증가하였다. 그러므로 Fig. 3의 유전율 10과 두께 0.8 cm인 경우 유전율 허수값이 변함에 따라 비투자율 실수부를 위로 올리는 효과가 있고, 반대로 허수값의 경우 Fig. 4의 유전율 10에서 두께가 0.8 cm의 곡선을 밑으로 내리는 효과가 있다. 페라이트 함량이 50 vol%인 복합재료의 경우 1.9 GHz에서 복소투자율 값( $\mu=2.2-j1$ )을 Fig. 6에 찍어 본 결과, 유전율 허수값이 2인 영역의 완전정합점 근처의 값임을 알 수 있었다.

Fig. 7은 1.9 GHz용 전자파 흡수체를 구현할 수 있는 영역을 나타낸 것이다. 유전율과 두께를 바꾸었을 경우, 이들의 공통범위에 설정된 투자율 실수값

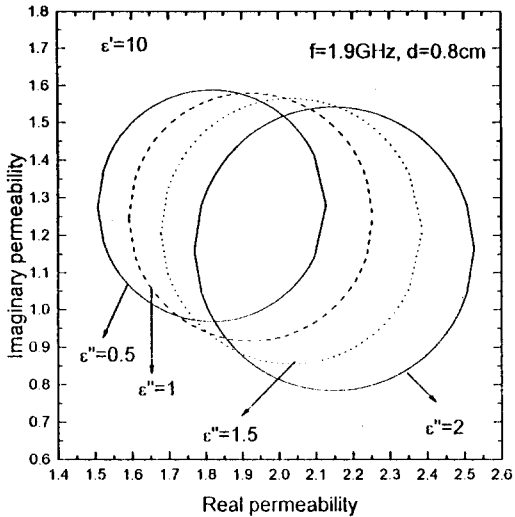


Figure 6. Matching boundaries as a function of  $\epsilon''$  at a fixed  $f \cdot d$  value of 1.52 GHz cm.

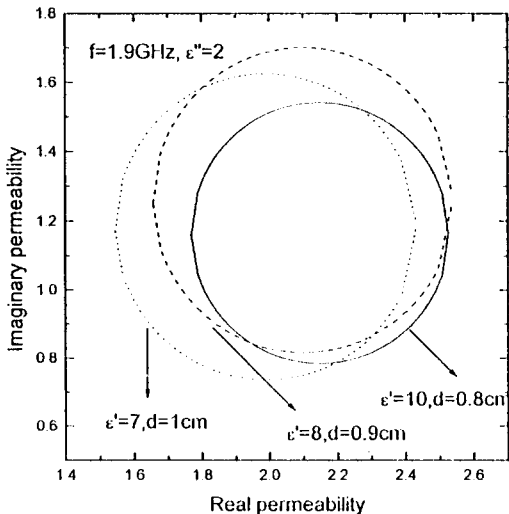


Figure 7. Desirable region for an electromagnetic wave absorber at 1.9 GHz.

(2.2), 허수값(1)이 모두 만족하므로 이 공통범위내에서는 모두 20 dB 이상의 흡수능을 발휘한다. 즉 이 공통범위는 세 가지 경우를 모두 만족하는 영역이다. 그러므로 이 범위내대로 복소투자율을 제어하면 유전율이나 두께의 편차로 인한 특성 저하를 방지할 수 있다. 또한 이 그림을 통해 알 수 있는 것은 에폭시-

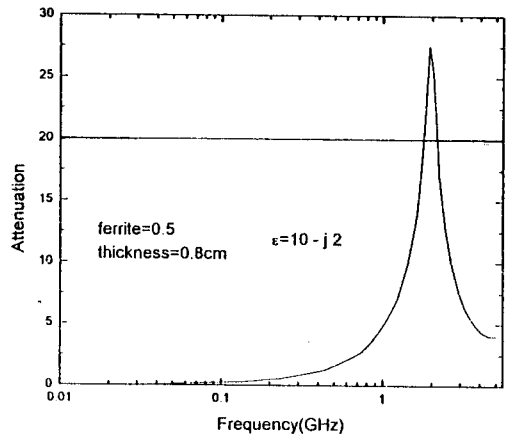


Figure 8. Attenuation behavior by numerical estimation.

페라이트 복합재료에 유전체를 첨가하면 유전체의 첨가량이 증가함에 따라 전자파 흡수체를 보다 얇게 구현할 수 있음을 간접적으로 알 수 있었다. 이는 Naito에<sup>7</sup> 의한 실험 결과와도 일치하였다.

Fig. 8은 페라이트 함량이 50 vol%인 에폭시-페라이트 복합재료에 유전체를 첨가하여 Fig. 7의 유전율 실수값이 10, 허수값이 2, 두께가 0.8인 복합재료를 구현하였을 경우 전자파 흡수능을 계산에 의해 구한 것을 나타내었다. 1.9 GHz에 피크의 중심이 오고 대역폭도 400 MHz에 정도의 값을 갖는 우수한 전자파 흡수체를 구현할 수 있을 것으로 예상되었다. 이 계산은 실험에 의해 측정된 에폭시-페라이트 복합재료의 복소투자율값을 대입하였고 가상의 유전율 실수값과 허수값을 대입하여 얻은 것으로 실제 실현가능한 결과로 보아도 무리가 없을 것이다.

### 결론

1.9 GHz에서 20 dB 이상의 전자파 흡수능을 갖는 전자파 흡수체를 구현하고자 할 때 이에 대한 설계를 제시하였다. 페라이트 함량이 50 vol%인 에폭시-페라이트 복합재료로 20 dB 이상의 흡수능을 발휘하는 전자파 흡수체를 구현함에 있어서 유전손실 재료를 첨가하여 유전율 실수부와 허수부의 값을 변화시킨 복합재료로 만들면 실현가능하다는 것을 설계를 통해 알 수 있었다. 유전율 및 두께의 오차 허용범위를 제

시함으로써 공정상 나타나는 정밀도의 한계를 극복할 수 있는 방안을 마련하였다. 또한 재료의 유전율을 크게 함으로써 전자파 흡수체의 두께를 얇게 할 수 있음을 알았다.

### 참 고 문 헌

1. Y. Naito and K. Suetake, *IEEE Trans. Micro. Theo. and Tech.*, **MTT-19**(1), 65 (1971).
2. H. M. Musal and H. T. Hahn, *IEEE Trans. Magn.*, **25**(1), 3851 (1989).
3. K. Y. Kim, W. S. Kim, and S. Y. Hong, *J. Kor. Phys. Soc.*, **24**(6), 456 (1991).
4. H. D. Choi, K. C. Han, W. S. Kim, K. Y. Kim, and T. J. Moon, *Polymer(Korea)*, **19**(5), 587 (1995).
5. 김왕섭, 고려대학교 재료공학과 박사학위 논문 (1993).
6. K. Y. Kim, W. S. Kim, and S. Y. Hong, 전자공학회 논문집, **28**, 9 (1991).
7. Y. Naito and T. Mizumoto, "전자정보통신학회논문집", **69-C**(3), 257 (1986).