

에폭시-페라이트 복합재료의 전파 흡수 특성

최형도·김왕섭*·한기철·김정용*·문탁진†

고려대학교 재료공학과, *한국과학기술연구원 세라믹스공정센터

(1995년 4월 19일 접수)

Electromagnetic Wave Absorbing Characteristics of Ni-Zn Ferrite/Epoxy Composites

Hyung Do Choi, Wang Sup Kim*, Ki Chul Han, Kyung Yong Kim*, and Tak Jin Moon†

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

*Ceramic Processing Center, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 130-650, Korea

(Received April 19, 1995)

요약 : 최근, 전자장치와 통신장치에 있어서 EMI가 심각한 문제로 대두되고 있고 이런 문제를 해결하기 위해 전파흡수체의 개발이 필요하다. 본 연구에서 Ni-Zn 페라이트/에폭시 복합재료의 전파 흡수 거동을 페라이트 함량 및 입자의 크기 함수로 분석하였다. 복합재료는 cement mixed method에 의해 동축형, 토로이달형, 원판형으로 시편을 준비하였고, Impedance/Gain Phase Analyzer(HP4194A)와 Network Analyzer(HP8753C)로 1 MHz에서 5 GHz의 주파수 영역에서 복소투자율과 복소유전율의 값을 얻었다. 이동통신용 1.9 GHz 대역에서 10 dB이상의 감쇠능을 갖는 전파흡수체를 디자인 하였다. 에폭시-페라이트 복합재료의 전파 흡수 거동은 충전된 페라이트의 함량이 증가함에 따라 감쇠곡선의 중심주파수가 낮은 주파수 대역으로 이동하며, 최대값이 증가한다. 페라이트 입자의 크기의 효과는 페라이트 함량 및 가공의 영향에 비해 이차적인 효과를 가진다. 또한 복합재료의 초투자율과 공진주파수를 안다면 전파 흡수 거동을 simulation에 의해 예측할 수 있었다.

Abstract : Recent electronic devices and telecommunication system provided some new and serious problems such as EMI, and recent microwave-absorbing materials must be developed to solve these problems. In this study, the effects of volume fraction of ferrite, and particle size on the electromagnetic absorbing behaviors of an epoxy composite containing a Ni-Zn ferrite were investigated. The composites were prepared by the cement mixed method and shaped coaxial, toroidal, and disc type. The complex permeability and permittivity were obtained using an Impedance/Gain Phase Analyzer(HP4194A) and a Network Analyzer(HP8753C) in the frequency ranges from 1 MHz to 5 GHz. Microwave-absorber with attenuation over 10 dB at mobile communication band of 1.9 GHz was designed. The microwave-absorbing behavior of the composite showed that the attenuation curve was shifted to a lower frequency band and the corresponding maximum attenuation value was increased with increasing the amount of the ferrite. The particle size of the ferrite had minor effect on the microwave-absorbing behavior of the composite. In addition the simulation result of microwave attenuation indicated that it is possible to pre-estimate the microwave absorbing behavior of the composite if the initial permeability and the resonance frequency of composite are known.

Keywords : electromagnetic absorber, attenuation, composite.

서론

실험

국내에서 개인 이동통신 시스템이 개발되고 있어 1.9 GHz대역의 이동통신 전파가 전국적으로 사용될 예정이고 전파반사에 의한 많은 장애가 예상되고 있다. 이동통신용 1.9 GHz대역의 전파가 건물내부나 구조물에 반사되어 혼선을 야기하거나 시스템 내부에서 차단되지 않고 외부로 방사될 때, 적극적인 대책으로 EMI로 인한 문제들을 최소화시키기 위한 노력의 하나로서 제시되는 것이 전파흡수체이다. 전파흡수체는 도전성, 유전성, 자성 전파흡수체를 사용하여 입사된 전파에너지를 흡수하여 열에너지로 변환하는 것을 말하는데 페라이트를 이용한 전파흡수체는 자성페라이트가 갖는 자성손실을 이용한 것으로 재료의 조성, 두께, 복소투자율, 및 복소유전율 등에 의해 전파 흡수 거동이 영향을 받는다.¹

소결체 페라이트만으로 구성된 전파흡수체는 VHF와 UHF에서 우수한 전파흡수 특성을 나타내지만 전파흡수능을 발휘하는 대역폭이 좁다.² 따라서 소결체 페라이트의 화학조성, 결정입자크기, porosity 등을 조절하여 전파흡수체의 특성을 개선하고 있다.³ 그러나 이러한 개선만으로는 전자파 흡수 주파수대역을 광대역화시키고 마이크로파 영역에서 흡수능을 갖는 재료를 구현하기에는 한계가 있어, 페라이트 분말을 수지등의 절연물에 분산시킨 페라이트 복합재료를 이용한 마이크로파 영역에서의 전자파 흡수재료에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러므로 본 연구에서는 페라이트/고분자 복합재료를 이용하여 광대역 및 마이크로파 영역에서의 전자파 차폐 재료를 구현하는 방법들을 제시하고자 한다. Simulation에 의해 설계되는 design chart를 통해 target주파수 1.9 GHz에 대한 10 dB이상의 전자파 흡수능을 갖는 복소투자율 범위와 유전율 및 두께를 예측하였으며, 페라이트의 함량 및 입자크기를 실험 변수로 하여 전파흡수 특성을 고찰하였다. Han등⁴에 의해 언급한 모델에 의해 계산된 값과 실험을 통해 얻어진 결과를 비교하였다. 또한 simulation에 의한 설계를 실험 결과에 비추어 검증하였다.

본 실험에서 제작된 에폭시-페라이트 복합재료의 고분자 지지재료로는 Table 1의 물성을 갖는 cresol novolac epoxy resin(ESCN 195-6, 일본 스미토모화학)을 사용하였다. Fe₂O₃, NiO, ZnO (Aldrich, 99%)를 Table 2와 같이 평량하여 원료와 에탄올 및 쇄물의 무게비를 1:2:3으로 하여 24시간 혼합한 후 전기 건조기에서 10시간 건조시켰다. 건조된 시료를 box형 furnace에서 분당 5℃씩 승온하고 1200℃에서 2시간 유지시켜 열처리한 후 재분쇄하여 페라이트 분말을 만들었다.

이렇게 만들어진 페라이트분말을 170, 200, 230, 270, 325 mesh에 차례로 통과시켜 입자크기를 88-102, 62-74, 53-62, 44-53 μm사이로 조절하였다. 페라이트 분말의 표면은 실란계 결합제인 A-187 (γ-Glycidoxypopyl 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 아카리화학사)을 사용하였다. 측정시편은 압축성형하여 원판형, 토로이달형, 동축형으로 성형한 후 180℃에서 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 Ana-

Table 1. Properties of Cresol Novolac Epoxy

Property	Value
Softening temp (°C)	75.2
Tensile modulus (kg/mm ²)	1430
$\alpha \times 10E-5(1/^\circ C)$	2.33
Permeability	1
Permittivity	3.4

Table 2. Experimental Composition (wt%)

Raw material	Fe ₂ O ₃	ZnO	NiO
Ni-Zn ferrite	68.2	13.03	18.77

lyzer(HP4194A)를 사용하여 1 MHz-40 MHz의 주파수범위에서 inductance와 $Q(\mu_r'/\mu_r'')$ 를 측정하여 복소투자율을 구하였다. 50 MHz-5 GHz까지의 특성은 동축형 시편을 coaxial air line (HP85051-60007)에 삽입한 후 Network Analyzer(HP8753C)를 사용하여 반사계수 및 투과계수를 측정하고 계산에 의해 구하였다.⁵

결과 및 고찰

일반적인 전파흡수체는 전파흡수재료의 이면에 금속판을 부착시킨 구조로 사용되는데 이런 경우 평면파가 수직 입사할 때 전면의 입력 임피던스는 자유공간의 임피던스 Z_0 로 규격화하였을 경우

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

된다. 여기서 c 는 광속, f 는 주파수, d 는 재료의 두께이며 μ_r 과 ϵ_r 은 각각 재료의 비복소투자율과 유전율이다. 이때 전파감쇠량은 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 전파가 99% 혹은 90% 감쇠되는 20, 10 dB를 한계로 하고 있다. Kim등⁶은 식 (1)과 (2)를 이용하여 다음과 같이 전파 흡수체를 설계하는 방법을 제시한 바 있어 이를 사용하여 1.9 GHz용 전파흡수체를 설계하였다.

Fig. 1은 $\epsilon_r=7$ 이고 $f \cdot d$ 값이 1.9 GHz·cm인 복소투자율의 변화에 따른 감쇠량을 3차원적으로 도시한 것이다. 곡면상의 점들은 식 (2)에 의해 결정되는 감쇠량이고, 곡면의 정점이 완전 정합점에 해당된다. 이 감쇠표면과 10 dB 평면이 만나서 이

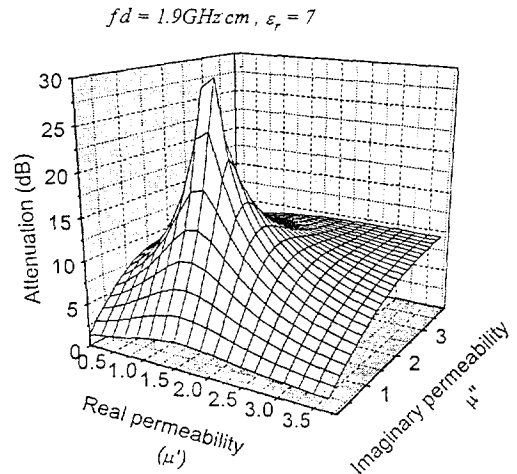


Fig. 1. Attenuation surface as a function of complex permeability at a fixed fd value and permittivity.

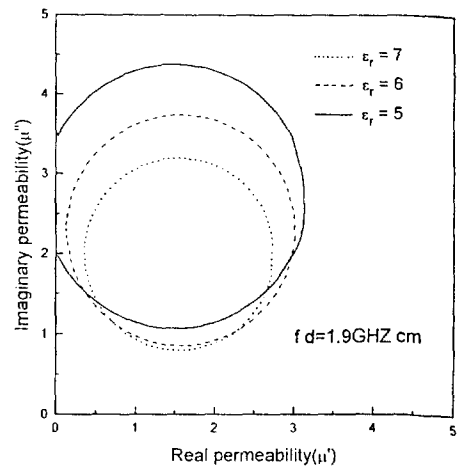


Fig. 2. Matching boundaries as a function of complex permeability and permittivity at a fixed fd value.

루는 단면이 정합범위가 된다. 이 단면의 내부가 10 dB이상의 감쇠량을 나타내는 영역이 된다. 정합 범위는 복소유전율과 $f \cdot d$ 값에 따라 변화한다.

Fig. 2는 $f \cdot d$ 값이 1.9 GHz·cm일때 복소유전율과 정합범위와의 관계를 나타낸 것이다. $f \cdot d$ 값이 1.9 GHz·cm인 것은 1.9 GHz에서 이 범위내에 있는 투자율 실수값과 허수값을 가진 재료를 사용하여 두께 10 mm의 전파흡수체를 만들 경우 10 dB

이상의 전파감쇠능력을 발휘한다는 것을 의미한다. 유전율이 증가함에 따라 정합범위는 μ'' 값이 낮은 쪽으로 이동하며 10 dB 이상의 감쇠능을 갖는 영역 크기가 감소하는 것을 알 수 있다.

그림에서 원의 중심이 완전 정합점에 해당되며 원의 경계가 10 dB 이상의 전파감쇠를 나타내는 복소투자율의 허용범위라 정의할 수 있다.⁷

Fig. 3은 $\epsilon_r=6$ 인 경우 $f \cdot d$ 값과 정합범위와의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 $f \cdot d$ 값의 변화는 주파수를 1.9 GHz로 고정할 경우 두께 변화를 의미한다. 주파수가 1.9 GHz에서 두께가 증가함에 따라 정합범위는 μ' 와 μ'' 가 낮은 쪽으로 이동하며, 정합범위의 반경이 감소하는 것을 알 수 있다. 이상의 설계를 통해, 실제 $f \cdot d$ 값이 1.9 GHz·cm인 것을 설계 목표로 하였다. 이 값에서 정합범위내에 투자율 및 유전율의 값을 갖는 전파 흡수체를 구현하기 위하여 Han등⁴에 의해 제안된 전자기적 특성의 혼합법칙을 이용하여 복합재료의 조성을 설정하였고, 이 복합재료의 전파 흡수에 대한 두께, 페라이트 함량, 및 페라이트 입자의 크기의 영향을 고찰하였다. 먼저, 선정된 재료의 특성을 살펴보면 충전재로 사용된 Ni-Zn 페라이트 소결체의 경우 1MHz에서 투자율이 약 90정도이며 공진주파수가 약 0.039 GHz이었다. 복소투자율은 주파수에 대해 분산 거동을 보이는 반면 복소유전율의 실수값은 측정 주파수영역에서 거의 일정하게 약 9.1 정도를 나타내며 허수값은 무시할 만큼 작은 값을 나타내었다.

Fig. 4는 페라이트 함량이 60 vol%인 복합재료의 경우 주파수와 두께에 따른 감쇠거동을 나타낸 것이다. 흡수재료의 두께가 증가함에 따라 감쇠곡선의 중심 주파수(f_m)가 낮은 주파수로 이동하였다. 주파수 관점에서 전파흡수 특성의 평가는 F (figure of merit, $\Delta f/f_m$)로 평가할 수 있는데 이 복합재료의 경우 약 65~70% 정도의 값을 가진다. 여기서 Δf 는 허용감쇠능 이상의 주파수 대역폭을 나타낸다. F 가 20%이상의 경우 광대역형 전파흡수재료로 사용가능하기 때문에 본 재료의 경우도 광대역형 전파흡수재료로 사용될 수 있음을 알 수

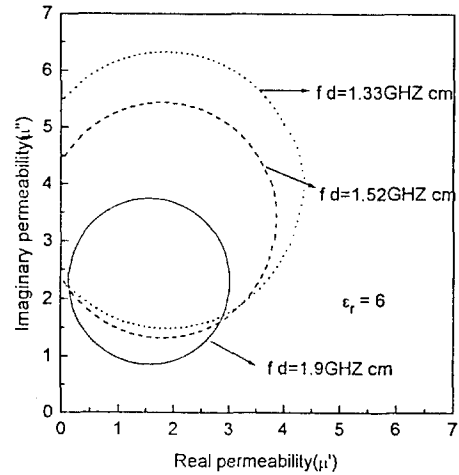


Fig. 3. Matching boundaries as a function of complex permeability and fd value at a fixed permittivity.

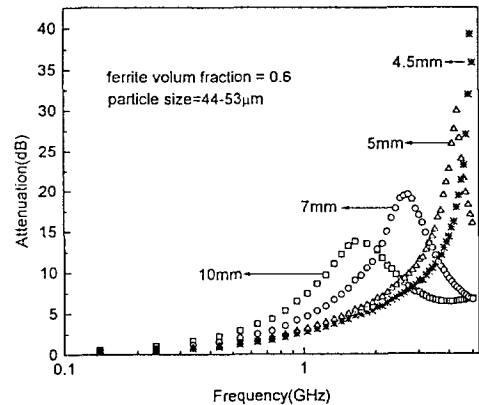


Fig. 4. Attenuation behaviors of the composite for various thickness at a fixed ferrite volume fraction (0.6).

있었다.⁸ Fig. 5는 복합재료의 두께를 10 mm로 고정하였을 때 페라이트 함량 변화에 따른 감쇠특성을 나타낸 것이다. 페라이트 함량이 증가함에 따라 중심주파수가 낮은 주파수 대역으로 이동하며 최대값이 증가함을 알 수 있다. Fig. 3에서 동일한 두께에서 정합범위는 주파수가 감소함에 따라 왼쪽으로 이동하였는데, 이것은 주파수가 감소함에 따라 정합범위내의 복소투자율이 증가한 것을 의미한다. 페라이트 함량이 증가함에 따라 복합재료의 복소투자율이 증가하므로 중심주파수는 낮은 주파수

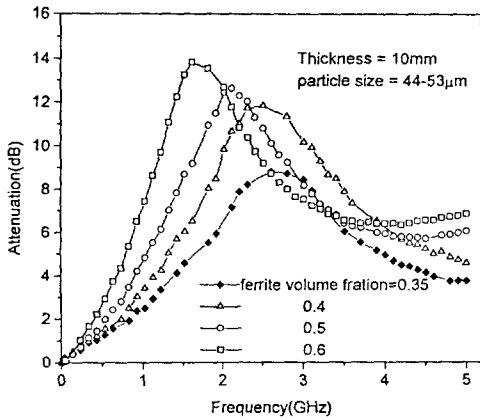


Fig. 5. Attenuation behaviors of the composite for various ferrite volume fraction.

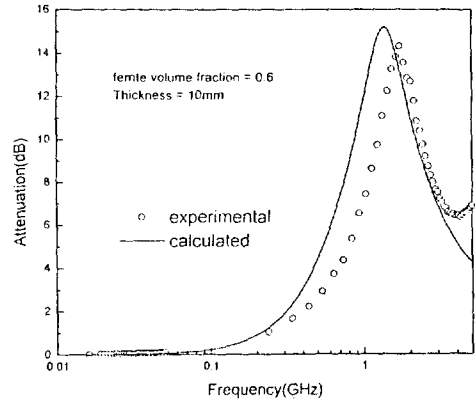


Fig. 7. Comparison of the experimental value with the calculated value for attenuation.

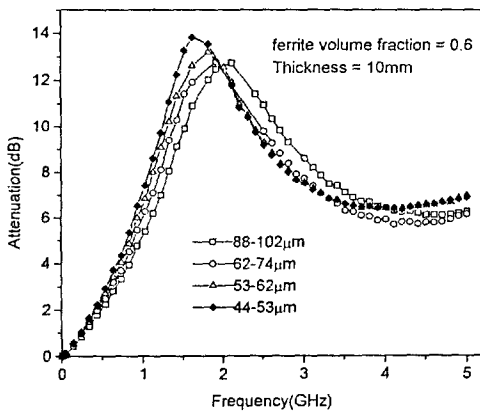


Fig. 6. Attenuation behaviors of the composite for various particle size at a fixed ferrite volume fraction (0.6).

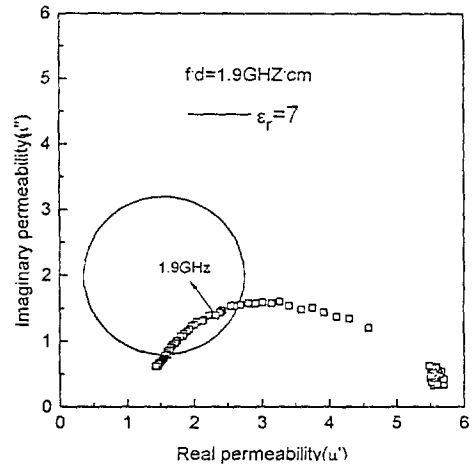


Fig. 8. Comparison of the matching boundary with the calculated value.

대역으로 이동한 것이다. 페라이트 함량이 35 vol %인 복합재료의 경우는 두께를 변화시켰을 때 측정주파수 대역에서 감쇠가 작게 나타났다. 그러므로 본 연구에서 관심을 둔 1-3 GHz의 측정주파수에서 복합재료가 전파흡수특성을 나타내기 위해서는 페라이트 함량이 적어도 40 vol% 이상이 되어야만 된다는 것을 알 수 있다. 이상의 결과로 사용목적에 따라 target 주파수가 설정되면 복합재료의 두께 및 페라이트 함량을 변화시켜 원하는 전파흡수체를 구현할 수 있을 것이다.

Fig. 6은 두께가 10 mm이고 페라이트 함량이 60 vol%인 복합재료의 입자 크기에 대한 전파흡수 특성을 나타낸 것이다. 입자의 크기가 증가됨에 따라 중심주파수가 높은 주파수로 이동하였고 최대값이 감소하는데, 이는 Han 등⁴의 연구 결과에서 나타난 것같이 페라이트 입자크기에 대한 영향보다는 기공에 의한 영향으로 판단된다. 즉 페라이트 입자크기가 증가할수록 기공율이 증가하는데 기공도에 에폭시와 마찬가지로 비자성체이기 때문에 복합재료 제조시 기공이 형성되면 비자성체의 부피가 증가하여, 실제 복합재료의 비자성체와 자성체의 부

피비가 원래 의도한 부피비와 일치하지 않게 된다. 이 때문에 감쇠특성곡선의 중심주파수가 높은 주파수로 이동하게 되며 감쇠의 최대값도 작게 나타난 것이다. Figs. 5와 6을 비교해 보면 Fig. 5의 함량 변화에 대한 감쇠특성곡선과 유사한 거동을 보인다는 것을 알 수 있다. 그러므로 복합재료의 전자기적특성과 감쇠특성은 페라이트 함량 및 기공율에 주된 영향을 받고, 페라이트 입자크기는 이차적인 효과를 가진다고 판단하였다. 따라서 복합재료로 전파흡수체를 구현함에 있어서 기공에 의해 전파흡수특성이 변하므로, 동일한 페라이트 함량에서 기공의 제어로 유효주파수를 어느 정도 조절할 수 있을 것이다. 다음은 Han등의 모델을 이용하여 계산한 투자율, 유전율값을 식 (1)과 (2)에 대입하여 감쇠량을 계산한 것과 실험값을 비교한 것으로 Fig. 7에 나타내었다. 중심주파수가 약간 이동하고 초기 주파수대역이 차이가 있지만 계산값과 실험값이 비교적 잘 맞는 것을 알 수 있다. 그러므로 복합재료의 감쇠 특성 또한 본 연구에서 설정한 모델을 이용하면 예측할 수 있음을 알았다.

Fig. 8은 전술한 설계의 타당성을 실험값과 비교하여 검증한 것이다. 실선의 원은 Fig. 2의 유전율 7값을 갖는 10 dB이상의 흡수능을 갖는 정합범위를 나타내며 square는 페라이트 함량이 60 vol%인 복합재료($\epsilon_r \approx 7$)의 복소투자율의 실험값을 투자율 실수부와 허수부로 나타낸 것이다. Square의 오른쪽 값에서 왼쪽으로 가면서 주파수가 증가한 것이다. 본 연구에서 target으로 한 주파수가 1.9 GHz인데 그림에서 이 주파수가 정합 범위내에 존재하는 것을 알 수 있다. 그러므로 1.9 GHz용 전파흡수체를 제조함에 있어서 Figs. 2와 3을 이용한다면 제조시의 시행착오를 최소화할 수 있으며 경비 및 시간을 절감할 수 있는 기대효과가 있다. 또한 이 결과로 알 수 있는 것은 $f \cdot d$ 값을 고정한 것이므로 두께를 변화시키면 이 조성의 복합재료로 다른 주파수에서의 전파흡수체를 구현할 수 있다는 점이다.

결론

1. 에폭시-페라이트 복합재료로 1.9 GHz용 전파흡수체를 구현함에 있어서 10 dB 이상의 감쇠량을 나타내는 정합범위를 설계를 통해 제시하였다. 복소유전율 이 변함에 따라 정합범위가 이동하였으며 그 크기도 변함을 알 수 있었다. 또한 두께가 변함에 따라 정합범위가 변한다는 점을 알았다.

2. 에폭시-페라이트 복합재료의 전파 흡수 특성은 복소투자율, 복소유전율, 두께 및 주파수에 따라 영향을 받고, 페라이트 함량이 증가함에 따라 감쇠 특성 곡선의 중심주파수가 낮은 주파수로 이동하며 최대값이 커짐을 알 수 있었다. 또한 페라이트 입자크기에 따른 전파 흡수 특성은 이들의 효과보다는 기공에 의한 영향이 더 크게 작용한 것으로 판단된다.

감사의 글 : 본 연구는 한국전자통신연구소의 계통 연구 과제로서 수행된 것으로 이에 그 재정적 지원에 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. 石野建, *Electronic Ceramic*, **19**, 22 (1988).
2. K. Y. Kim, W. S. Kim, and Y. D. Ju, *Kor. Phys. Soc.*, **31**(5), 639 (1991).
3. Hideji Igarayoshi and kiyosi okazaki, *J. Am. Ceram. Soc.*, **60**, 1 (1977).
4. K. C. Han, H. D. Choi, T. J. Moon, W. S. Kim, and K. Y. Kim, *Poly.(Korea)*, **18**(6), 1006(1994).
5. K. Y. Kim, W. S. Kim, and J. K. Lee, 전자공학회 논문집, **28**, 9 (1991).
6. 김왕섭, 고려대학교 재료공학과 박사학위 논문 (1993).
7. K. Y. Kim, W. S. Kim, and S. Y. Hong, *J. Kor. Phys. Soc.*, **24**(6), 456 (1991).
8. 清水康敬, "전자파의 흡수 및 차폐", p. 132, 일경 기술도서(주), 1990.