

복합재료를 이용한 1.9 GHz용 전자파 흡수체 설계 (Ⅱ): 경사 입사

최 형 도 · 윤 호 규 · 문 탁 진[†]

고려대학교 재료공학과
(1996년 7월 22일 접수)

A Design of the Electromagnetic Wave Absorber at 1.9 GHz Using Composites (Ⅱ): Oblique Incidence

Hyung Do Choi, Ho Gyu Yoon, and Tak Jin Moon[†]

Dept. of Materials Science, Korea University, Seoul 136-701, Korea
(Received July 22, 1996)

요 약: 경사로 입사하는 1.9 GHz의 전자파를 20 dB 이상 감쇠할 수 있는 전자파 흡수체의 설계 방법을 검토하였다. TE (transverse electric wave)에 대하여 정합범위는 입사각이 증가함에 따라 투자율 실수부가 커지고 허수부가 작아지는 방향으로 이동하였으며 그 크기도 입사각이 증가함에 따라 작아졌다. TM (transverse magnetic wave)의 경우는 입사각이 커짐에 따라 정합범위의 투자율 실수부가 작아지고 허수부가 커지는 방향으로 이동하였으며 정합범위의 크기가 증가하는 TE파와 반대되는 경향을 보였다. 입사각을 고려한 전자파 흡수체를 설계할 경우에는 목표 주파수, 재료의 두께 및 입사각을 먼저 결정한 후, 정합범위를 만족하는 재료정수의 복합재료를 선정해야 함을 알았다.

ABSTRACT: A designing method of an electromagnetic wave absorber, whose obliquely incident electromagnetic wave attenuates more than 20 dB at 1.9 GHz, was investigated. In TE (transverse electric) wave, the matching boundary was moved toward the higher value of the real part and toward the lower value of the imaginary part of permeability, respectively, and the size of the matching boundary was decreased with increasing the incident angle. On the other hand, the matching boundary in the TM (transverse magnetic) wave exhibited the other way around to the case of TE wave. To design the electromagnetic wave absorber regarding the incident angle, it was found that the target frequency, thickness of material, and incident angle should be determined prior to the determination of the material constants of the composite within the matching boundary.

Keywords: incident angle, electromagnetic wave absorber, design, composite.

서 론

전자, 통신기기의 발달과 대량보급에 의해 전자파의 사용량이 증가되고 이에 따른 전자파 공해가 고품질의 전자파 환경 조성에 장애물이 되고 있으며 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 전자파 흡수 특성을 조절하기 위해서는 반드시 이들 변수의 영향을 고려하지 않으면 안된다. 따라서 이러한 변수에 대한 영향을 고려하여 전자파 흡수체의 설계방안을 제시하고자 하는 노력이 행해져 왔으며,^{1,2} 특히 Kim

등은³ 이론식을 대수적으로 풀고 완전정합점의 개념 대신 실제 발생할 수 있는 오차를 감안한 정합범위의 개념을 도입하는 시도로 설계의 실용성을 향상시켰다. 그러나 대부분의 경우 전자파가 수직으로 입사하는 경우에 제한된 설계방법만이 제시되어졌고, 설계 I 편에서도 수직입사에 대한 전자파 흡수체의 설계 방법이 제시되었다.⁴ 그러나 실제 전자파가 자유공간을 통해 전파될 때 매질에서 수직으로 입사되지 않고 여러 각으로 입사되는 경우가 많다. 교량에서 레이다 장애 등을 생각할 때, 지형과 반사물체의 위치 등의 관계에서 특정 입사각에 대해서 반사계수를 작게 하는 것이 필요한 경우도 생길 수 있다. 그러므로 전자파 흡수체를 설계할 때 입사각에 따른 영향도 아울러 고려되어야 할 것이다. 전자파가 전자파 흡수체에 경사로 입사하는 경우는 TE파(transverse electric wave), TM파(transverse magnetic wave)의 두 가지 편파가 있고 각각의 편파에 의해 그 반사계수 및 정합범위가 다르게 될 것이며, 전자파 흡수 특성도 입사각에 영향을 받을 것으로 예상된다.

그러므로 본 연구에서는 최근 이동통신에서 관심을 갖는 주파수 1.9 GHz에 대하여 복합재료를 이용한 전자파 흡수체의 입사각의 영향을 고려한 설계방법을 제시하였다. 또한 입사각의 크기에 따른 전자파 흡수 특성의 변화를 조사하였다.

실 험

본 실험에서 제작된 에폭시-페라이트 복합재료의 고분자 지지재료로는 *ortho*-cresol novolac epoxy resin (ESCN 195-6, 일본 스미토모화학)을 사용하였다. Fe_2O_3 , NiO, ZnO (Aldrich, 99%)를 Table 1과 같이 평량하여 원료와 에탄올 및 쇄불의 무제비를 1:2:3으로 하여 24시간 혼합한 후 전기 건조기에서 10시간 건조시켰다. 건조된 시료를 박스형 로에서 분당 5℃씩 승온하고 1200℃에서 2시간 유지시켜 열처리한 후 재분쇄하여 페라이트 분말을 만들었다.

이 페라이트 분말을 170, 200, 270, 325 체에 차례로 통과시켜 입자크기를 74-88 μm 와 44-53 μm 사이로 조절하였고, 입자들이 응집된 것을 제거하기 위해 초음파로 분리작업을 5회 실시한 후, 이들을 직경

Table 1. Experimental Composition (wt%)

raw material	Fe_2O_3	ZnO	NiO
Ni-Zn ferrite	66.8	23.83	9.37

1.5 cm, 길이 1 m인 유리관에 넣고 침강시켰다. 이를 3개의 층으로 분리하여 중간에 층을 취해 분말의 입자를 분류하였다. 한 입자 크기 당 침강을 3번 실시하여 가능한 한 좁은 분포를 갖는 입자로 분류하였다. 페라이트 분말의 표면은 실란계 결합제인 A-187 (γ -glycidoxypopyl trimethoxysilane, Union Carbide사)을 1 wt% 첨가하여 처리한 후 이것을 50 vol%로 에폭시에 첨가하여 혼합하였다. 이때 경화제는 phenol novolac resin (Tamanol 758, 일본 아카리화학사)을 사용하였다. 측정시편은 압축성형하여 원판형, 토로이달형 및 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 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.

결과 및 고찰

전자파가 Fig. 1과 같이 전자파 흡수체에 경사로 입사한 경우에는 입사파의 편파에 의해 TE파(transverse electric wave)와 TM파(transverse magnetic wave)로 나누어 생각하지 않으면 안된다. 입사각이 θ 일 때 반사계수와 전면의 입력 임피던스는 다음과 같다.⁵

① TE파에 대한 반사계수와 흡수체 전면의 입력 임피던스

$$S_{TE} = \frac{Z_{TE} - 1/\cos \theta}{Z_{TE} + 1/\cos \theta} \quad (1)$$

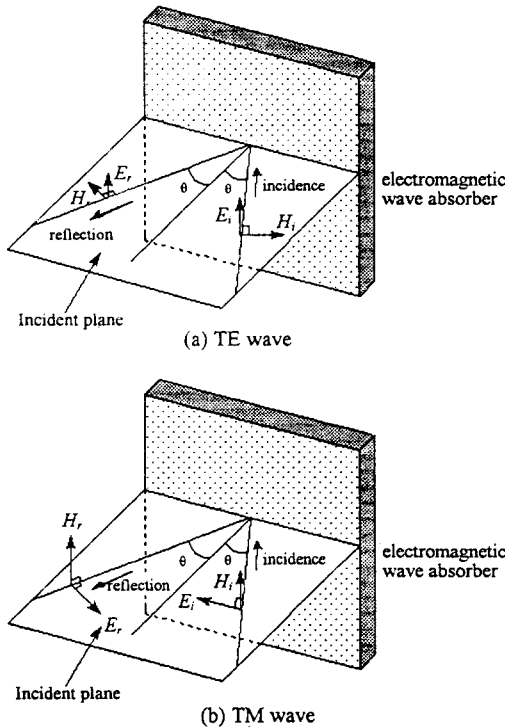


Figure 1. Schematic diagram of TE wave and TM wave in oblique incidence.

$$Z_{TE} = Z_0 \frac{\mu_r}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r - \sin^2 \theta}} \times \tanh \left(j \frac{2\pi}{c} \sqrt{\mu_r \epsilon_r - \sin^2 \theta} \cdot f d \right) \quad (2)$$

② TM파에 대한 반사계수와 입력 임피던스

$$S_{TM} = \frac{Z_{TM} - \cos \theta}{Z_{TM} + \cos \theta} \quad (3)$$

$$Z_{TM} = Z_0 \frac{\sqrt{\mu_r \epsilon_r - \sin^2 \theta}}{\epsilon_r} \times \tanh \left(j \frac{2\pi}{c} \sqrt{\mu_r \epsilon_r - \sin^2 \theta} \cdot f d \right) \quad (4)$$

여기서 c 는 광속, f 는 주파수, d 는 재료의 두께이며 μ_r 과 ϵ_r 는 각각 재료의 비투자율과 유전율이다. Z_0 는 자유공간의 임피던스이다.

이때 전자파 감쇠량은 다음과 같이 표현된다.

$$\text{Attenuation(dB)} = 20 \cdot \log \left| \frac{z_1 - 1}{z_1 + 1} \right| \quad (5a)$$

$$\text{Attenuation(dB)} = 20 \cdot \log \left| \frac{z_2 - 1}{z_2 + 1} \right| \quad (5b)$$

여기서 $z_1 = \frac{Z_{TE}}{Z_0}$, $z_2 = \frac{Z_{TM}}{Z_0}$ 이며, 식 (5a)와 식 (5b)는 각각 TE파와 TM파에 대한 전자파 감쇠량을 나타낸다. 식 (5a)와 (5b)에서 알 수 있듯이 입력단의 규격화 임피던스값이 1이 되면 무한대의 감쇠가 발생하여 반사가 전혀 일어나지 않은 조건이 되는데 이를 완전 정합이라 한다.

또한 Fig. 2와 Fig. 3은 식 (5a)와 (5b)에 의해 결정되는 20 dB 이상의 감쇠량을 나타내는 영역을 입사각에 따라 설계한 것이다. Fig. 2는 $f \cdot d$ 가 1.9 GHz · cm 이고 유전율이 10일 때 TE파에 대하여 입사각에 따른 각각의 정합범위를 나타낸 것이다. 정합범위는 입사각 (수직입사를 0°로 규정함)이 증가함에 따라 투자율 실수부가 커지고 허수부가 작아지는 방향으로 이동하며, 그 크기가 입사각이 증가함에 따라 작아진다. 60°로 입사하는 전자파가 문제가 되는 경우, Fig. 2의 60°정합범위내를 만족하는 재료 정수를 찾으면 20 dB 이상의 전자파 흡수능을 발휘하는 전자파 흡수체를 만들 수 있다. 이것은 복합재료가 1.9 GHz에서 투자율 실수부가 1.55이고 허수부가 0.4인 재료정수를 갖으면, 두께가 10 mm인 1.9 GHz용 전자파 흡수체로 사용할 수 있음을 의미한다. 이와 같은 설계를 이용하면 특정한 각으로 입사하는 전자파를 흡수하기 위해 전자파 흡수체를 기하학적으로 구성하지 않고 단순히 평면으로 제조하여도 입사각에 따른 문제를 해결할 수 있다.

Fig. 3은 $f \cdot d$ 가 1.9 GHz · cm 이고 유전율이 10일 때 TM파에 대하여 입사각에 따른 각각의 정합범위를 나타낸 것이다. 입사각에 따른 정합범위의 변화는 TE파와 반대의 경향을 나타낸다. 20 dB 이상의

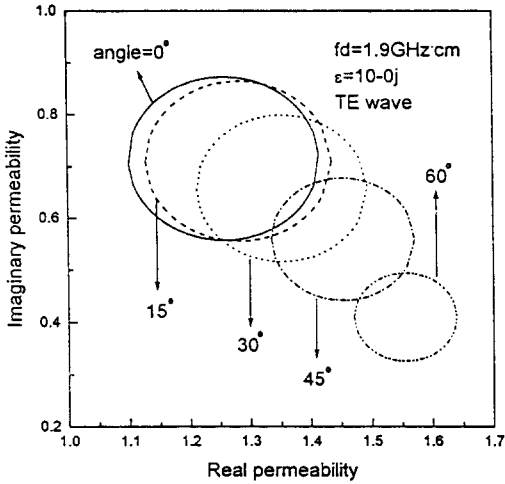


Figure 2. Matching boundaries as a function of incident angle (TE wave).

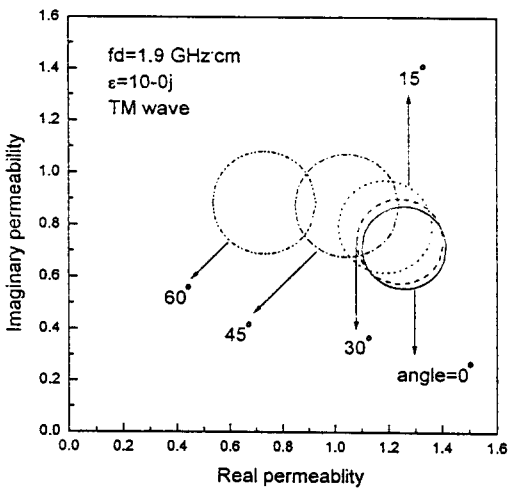


Figure 3. Matching boundaries as a function of incident angle (TM wave).

전자파 흡수능을 발휘하는 정합범위는 입사각이 커짐에 따라 투자율 실수부가 작아지고 허수부가 커지는 방향으로 이동하며, 정합범위의 크기가 입사각이 커짐에 따라 증가하였다.

에폭시-페라이트 복합재료의 전자파 흡수 특성에 대한 입사각의 영향에 관해 살펴 보았다. Fig. 4의 (a)와 (b)는 페라이트 입자 크기가 $40\ \mu\text{m}$, 페라이트 함량이 50 vol%, 그리고 두께가 11 mm인 복합재

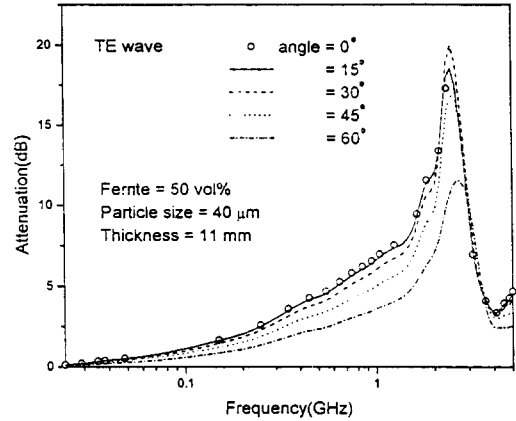


Figure 4(a). The attenuation of composite for various incident angle (TE wave).

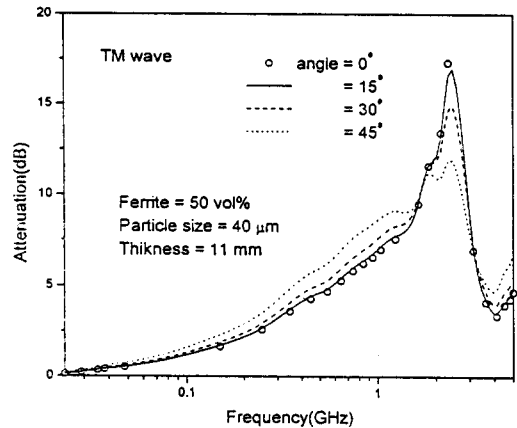


Figure 4(b). The attenuation of composite for various incident angle (TM wave).

료에 대하여 TE파와 TM파의 경우 입사각에 따른 전자파 흡수 특성을 나타낸 것이다. TE파의 경우 MHz 대역에서는 전자파 흡수능은 매우 작을 뿐만 아니라 입사각이 감소함에 따라, 즉 수직입사로 갈수록 흡수능도 커진다는 것을 알 수 있다. 이 복합재료로 전자파 흡수체를 구현할 경우 TE파에서는 30° 각으로 입사하는 전자파를 가장 잘 흡수하는 것을 알 수 있다. 특이한 것은 TE파의 경우, 이 재료는 입사각이 30° 일 때 가장 큰 흡수 피크를 나타내고 $15^\circ > 0^\circ > 45^\circ > 60^\circ$ 순으로 감소하게 된다. 이들보다 더 큰 각으로 입사하는 경우 반사계수가 매우 크게 되어

전자파 흡수능이 매우 작게 된다.

한편 Fig. 4(b)의 TM파와 경사 입사각이 증가함에 따라 전자파 흡수능의 피크는 감소한다. TE파의 경우 입사각에 따라 반사계수를 최소로 하는 입사각이 존재하는 반면 TM파의 경우는 수직입사일 때 가장 전자파 흡수능이 크며 입사각의 증가와 더불어 감소한다는 점이 TE파의 전자파 흡수 특성과 다른 점이다. 그러나 목표로 설정한 1.9 GHz대에서는 TE, TM파 모두 입사각이 증가함에 따라 흡수능도 함께 증가하고 있다.

Fig. 5의 (a)와 (b)는 페라이트 입자 크기가 $75\ \mu\text{m}$, 페라이트 함량이 50 vol%, 그리고 두께가 11 mm인 복합재료에 대하여 TE파와 TM파의 경우 입사각에 따른 전자파 흡수 특성을 3차원으로 나타낸 것이다. TE파와 TM파 모두 입사각이 커짐에 따라 전자파 흡수 특성이 증가하는 것을 알 수 있다. Fig. 4와 Fig. 5를 비교해 보면 입자 크기에 따라 입사각에 대한 전자파 흡수 특성은 각각 다르게 나타났다. TE파에서는 입자 크기가 $75\ \mu\text{m}$ 일 때 수직입사에서 전자파 흡수능의 피크가 가장 크고, $40\ \mu\text{m}$ 일 때는 30° 로 입사할 때 가장 큰 피크가 나타났다. 또한 입자가 작을 경우는 $2\sim 3\ \text{GHz}$ 에서 그 피크값이 나타나고 있으나, $75\ \mu\text{m}$ 의 입자를 사용하였을 경우는 1.9 GHz에서 피크값을 갖는다. 그러나 TM파는 두 경우 모두 입사각이 작아질 때 전자파 흡수능의 피크가 작아지는 것을 알 수 있었다. 위와 같은 결과는 어느 특정주파수에서 전자파 흡수 특성은 입사각에 따라 일정한 규칙이 없이 재료정수에 의해 불규칙하게 변하는 것을 의미한다. 복합재료의 재료정수(복소투자율, 복소유전율)는 주파수, 페라이트 입자 크기, 페라이트 함량 등에 따라 변하며 전자파 흡수 특성에 대한 입사각의 영향도 재료정수에 의해 각각 다르게 나타난다. 입사각에 대한 영향은 복합재료의 종류 및 조성에 따라 달라지기 때문에 본 논문에서의 실험결과가 일반적인 것은 아니다. 따라서 전자파 흡수 특성을 고려할 때 가장 중요한 것은 「어떤 특성을 갖는 전자파 흡수체를 제조할 것인가」이다. 즉 흡수해야 할 주파수를 선정하고 또한 두께는 어떻게 할 것인가, 어느 방향으로 입사하는 파를 흡수할 것인가를 정한 후, 이에 따라 설계를 해야 하고 설계된 정합범위를 만족하는 재료정수를 갖는 복합재료를

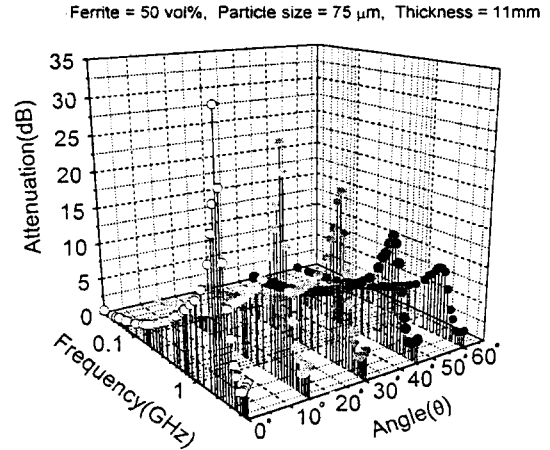


Figure 5(a). The attenuation characteristics in oblique incident angle (TE wave).

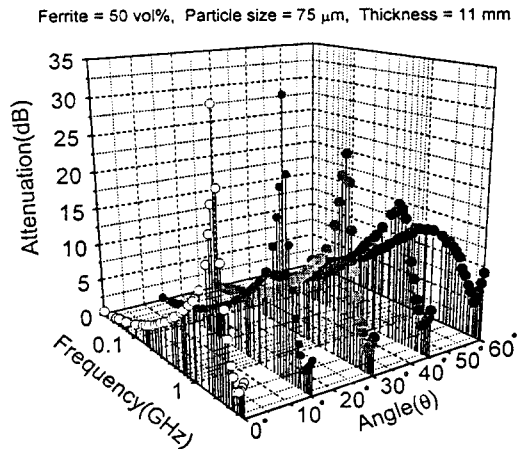


Figure 5(b). The attenuation characteristics in oblique incident angle (TM wave).

찾아 전자파 흡수체를 제조해야 한다. 경사로 입사에 대해 TE나 TM파 모두를 동시에 감쇠시킬 수 있는 전자파 흡수체의 구현은 단층의 복합재료로는 불가능하다. 이것은 Fig. 2, Fig. 3과 같이 정합범위내의 재료정수가 입사각에 따라 달라지므로 한 복합재료로 전자파 흡수체를 구현하여 입사각의 영향을 줄일 수 있는 데에는 한계가 있다. 그러나 복합재료에 대한 입사각의 영향을 최소화 하는 방안으로 전자파 흡수체 설계에서 TE파와 TM파의 공통범위 즉 여러 각을 공통으로 흡수할 수 있는 물성을 먼저 설계에서

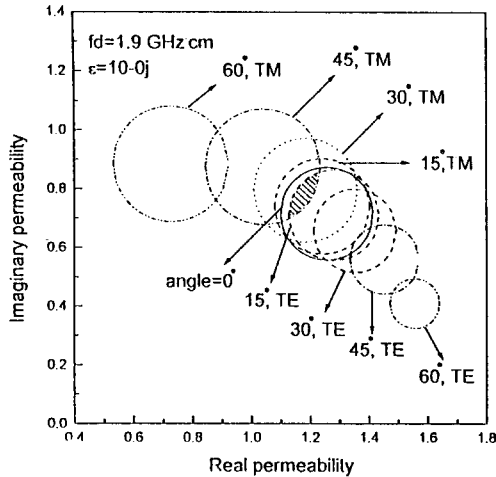


Figure 6. Matching boundaries as a function of oblique incident angle for TE and TM wave.

찾은 후 이에 맞추어 재료를 구현하면 어느 정도 입사각의 영향을 줄일 수는 있다.

Fig. 6은 Fig. 2의 TE파와 Fig. 3의 TM파를 공통으로 흡수할 수 있는 재료 설계의 물성 확보를 예로 나타낸 것으로, 빗금친 공통부분의 투자율 실수값과 허수값을 갖도록 전자파 흡수체를 설계할 경우, TE파에 대하여 최대 15°의 입사각, 또한 TM파에 대하여 최대 45°의 입사각으로 입사하는 전자파를 흡수할 수 있는 전자파 흡수체를 만들 수 있다.

결 론

전자파의 입사각도에 따른 전자파 흡수 특성을 조사하고, 1.9 GHz의 전자파가 경사로 입사할 경우의 전자파 흡수체 설계방법을 제시하였다. 본 설계와 실험을 통하여 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. TE파에 대하여 정합범위는 입사각이 증가함에 따라 투자율 실수부가 커지고 허수부가 작아지는 방향으로 이동하였으며 그 크기도 입사각이 증가함에 따라 작아졌다. TM파의 경우는 정합범위가 입사각이 커짐에 따라 투자율 실수부가 작아지고 허수부가 커지는 방향으로 이동하였으며 정합범위의 크기는 증가하였다.

2. 페라이트 입자 크기에 따라 입사각의 변화에 대한 전자파 흡수 특성은 일정한 규칙없이 각각 다르게 나타났다. 이것은 복합재료의 재료정수(복소투자율, 복소유전율)가 주파수 및 페라이트 입자 크기 등에 따라 다르고 전자파 흡수 특성에 미치는 입사각의 영향 또한 이 재료정수에 의해 변하기 때문이다. 따라서 전자파 흡수체를 설계할 경우에는 목표주파수, 재료의 두께 및 입사각도를 결정한 후, 정합범위를 만족하는 재료정수의 복합재료를 선정하여야 한다는 것을 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, W. S. Kim, I. S. Jeon, and T. J. Moon, *Polymer(Korea)*, **20**(4), 658 (1996).
5. Y. Shimazu, "Absorbing and Shielding of Electromagnetic Wave", Nikkei Technol. Press, p. 135, 1990.