

SrTiO₃-에폭시 복합재료의 전자파 흡수 특성

최형도[†] · 조광운 · 윤호규*

한국전자통신연구원 전자파공학연구소, *고려대학교 재료공학과
(1997년 10월 14일 접수)

Electromagnetic Wave Absorbing Characteristics of SrTiO₃-Epoxy Composites

Hyung Do Choi[†], Kwang Yun Cho, and Ho Gyu Yoon*

Radio Science Section, Electronics and Telecommunications Research Institute, Taejeon, Korea

*Department of Materials Science, Korea University, Seoul 136-701, Korea

[†]e-mail: choihd@etri.re.kr

(Received October 14, 1997)

요약: SrTiO₃-에폭시 복합재료의 SrTiO₃ 함량에 따른 전자기적 특성과 전자파 흡수 특성을 살펴 보았다. 복합재료의 복소유전율과 복소투자율은 SrTiO₃ 함량이 증가함에 따라 증가하고 공진주파수가 낮은 주파수 대역으로 이동하는 것을 알았다. 복소유전율과 복소투자율은 주파수에 따른 분산 거동을 나타내었다. SrTiO₃-에폭시 복합재료의 전자파 흡수 거동은 충전된 SrTiO₃의 함량과 두께가 증가함에 따라 감쇠곡선의 중심주파수가 낮은 주파수 대역으로 이동하는 특성을 나타냈다.

ABSTRACT: The effects of SrTiO₃ content on the electromagnetic properties and electromagnetic wave absorbing characteristics of SrTiO₃-epoxy composites were investigated. As the SrTiO₃ content increased, it was found that the complex permittivity and permeability of the composites increased and the resonance frequency moved toward low frequency range. The complex permittivity and permeability of composites were characteristic of the frequency dispersion. The electromagnetic wave absorbing behavior of the composites showed that the center frequency of the attenuation curve was shifted to a lower frequency band with increasing the amount of SrTiO₃ and the thickness of composite.

Keywords: SrTiO₃ composite, electromagnetic wave absorbing characteristic.

서 론

전자·통신장치에 있어서 전자파 환경에 대한 문제가 제기되어 전자파 장애, 전자파 내성, 그리고 전자파가 인체에 미치는 영향 등에 관한 관심이 국내외적으로 고조되어 왔다.¹ 특히 인체·생체 조직은 레이다, 전자오븐, 산업적인 마이크로파 장비 등과 같은 전자기적 발생원에 우연히 혹은 직업상 노출되는 경우가 많다. 그러나 전자파가 인체에 미치는 영향은 확실히 규명되지 않았으며, 인류가 풀어야 할 과제 중의 하나로 되어 왔다. 전자파가 인체에 미치는 영향을 조사하는데 사용되는 인체 팬텀이나 전자파에 대한 보

호대책 중의 하나로 제시되는 전파흡수체 등의 제조에 사용될 수 있는 고분자 복합재료에 대한 연구가 이러한 현실적인 문제를 해결하기 위한 방안으로 제시되고 있다.^{2,3}

일반적으로 고분자는 절연체이지만 다양한 기능성 충전재를 첨가하여 전자기적 특성을 변화시킬 수 있다. 이와같은 고분자 복합재료의 전자기적 특성은 첨가된 충전재의 종류, 충전재의 조성 및 미세구조,⁴ 크기와 이들의 함량에 의존한다고 알려져 있다.⁵ 특히 고분자에 충전재로 유전체를 첨가한 복합재료는 유전 손실을 이용한 전파흡수체와 전자파 환경 평가용 인체팬텀 등에 이용될 수 있다. 전파흡수체는 크게 도

전성, 자성, 그리고 유전성 전파흡수체로 세가지로 분류되며, 입사된 전파에너지를 열에너지로 변환하는 것을 말한다. 유전성 전파흡수체는 유전손실을 이용한 것으로 재료의 조성, 두께, 복소투자율 및 복소유전율 등에 의해 영향을 받는다. 전자파 환경 평가용 인체팬텀의 경우 인체조직의 전기정수 (유전율, 도전율 등)와 동일한 값을 갖는 재료로 제조하는데, 이 경우 고분자에 유전체를 첨가하여 인체의 유전율과 맞춘다. 전파흡수체나 인체팬텀 모두 측정주파수에서 복합재료의 복소유전율 및 복소투자율에 대한 주파수 분산거동이 이들 특성을 제어하는데 매우 중요한 인자이다.

그러므로 본 연구에서는 유전체로 SrTiO₃, 기지 고분자재료를 에폭시로 한 복합재료에 대한 충전재 함량에 따른 전자기적 특성과 이들 재료들이 갖는 전자 흡수 특성에 대하여 고찰하였다

실 험

SrTiO₃-에폭시 복합재료에서 에폭시는 *o*-cresol novolac epoxy resin ESCN 195-6 (일본스미토모 화학)을 사용하였고, 충전재로 사용된 유전체는 SrTiO₃ (Ferro사)로 1380 °C에서 소결하였고, 이를 다시 분쇄하여 SrTiO₃ 분말을 만들었다. SrTiO₃ 분말은 에폭시와 혼합전 약 100 °C에서 48시간 건조시켜 수분을 제거하였으며, 결합제로 실란계 A-187 (유니온 카바이드사)을 사용하여 SrTiO₃ 파우더의 표면을 처리하였으며, 에폭시에 첨가할 때에는 분산 효과를 높이기 위하여 저분자량의 Carnuba wax를 소량 첨가하였다. SrTiO₃-에폭시 복합재료는 건식 혼합 후, two roll mill을 사용하여 제조하였으며, SrTiO₃의 함량이 체적비로 30, 40, 50 및 60%인 복합재료를 얻었다.

전자기적 특성의 측정시편은 동축형으로 압축성형한 후 180 °C에서 5시간 유지시켜 경화시켰다. Air-gap의 영향을 최소화하기 위하여 동축형 시편의 내부와 외부벽에 Ag-paste를 적용하였다. 130 MHz-10 GHz까지의 특성은 동축형 시편을 coaxial air line (HP85051-60007)에 삽입한 후 network analyzer (HP 8719A)를 사용하여 S-parameter를 측정하여 Nicolson에⁶ 의한 방법으로 복소투자율과 복

소유전율을 계산하여 구하였다. 전자파 흡수 특성은 coaxial air line의 종단을 short시킨 후 S₁₁을 측정하여 다음과 같은 관계에서 전자파 흡수능을 결정하였다.

$$Attenuation = -20 \log |S_{11}| \quad (1)$$

결과 및 고찰

전자파 흡수체는 전자파 흡수재료의 이면에 금속판을 부착시킨 구조로 사용되는데 이런 경우 평면파가 수직입사할 때 전면의 입력 임피던스는 자유공간의 임피던스 Z₀로 규격화하였을 경우 다음과 같다.⁷

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

여기서 *c*는 광속, *f*는 주파수, *d*는 재료의 두께이며, μ_r 과 ϵ_r 은 각각 재료의 비투자율과 비유전율을 나타낸다. 이때 전자파 감쇠량은 다음과 같이 표현된다.

$$Attenuation (dB) = 20 \log \left| \frac{Z-1}{Z+1} \right| \quad (3)$$

식 (3)에서 알 수 있듯이 입력단의 규격화 임피던스값이 1이 되면 무한대 감쇠가 발생하여 반사가 전혀 일어나지 않은 조건을 만족하게 되는데 이를 완전 정합이라 말한다. 식 (2)와 식 (3)에서 재료의 복소투자율과 복소유전율의 주파수 특성을 알고 있으면 두께변화에 따른 전자파 감쇠량에 대한 계산이 가능하다. 또한 전자파 감쇠량은 재료의 비투자율과 비유전율, 주파수 그리고 재료의 두께에 따라 영향을 받으므로, 재료의 두께가 결정되면 특정주파수에서 전자파 흡수 특성은 재료정수 즉 재료의 비투자율과 비유전율에 의해 결정된다. 따라서 전자파 흡수 특성을 고려하기에 앞서 주파수에 따른 복합재료의 전자기적 특성을 고찰하는 것이 무엇보다 중요하다.

Fig. 1의 (a)와 (b)는 충전재로 사용된 SrTiO₃ 소결체의 복소유전율과 복소투자율을 나타낸 것이다. 복소유전율은 2 GHz 이상의 주파수 영역에서 분산거동을 보이며, 2차에 걸쳐 공진이 일어나는 것을 알 수 있다. 130 MHz에서 유전율은 45이며, 첫번째 공

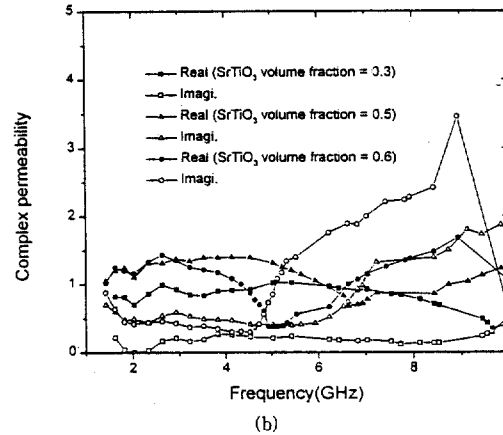
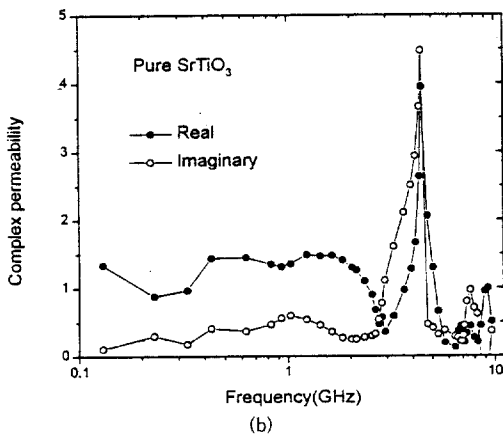
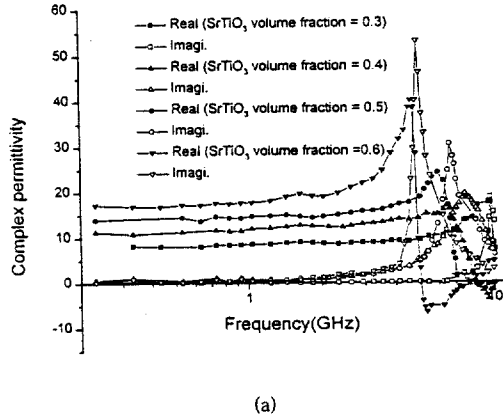
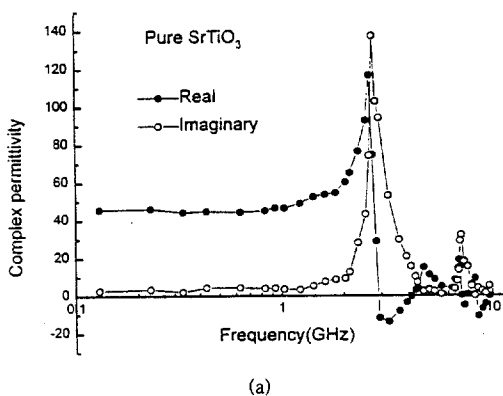


Figure 1. (a) The complex permittivity of the sintered SrTiO₃ and (b) the complex permeability of the sintered SrTiO₃.

Figure 2. (a) The complex permittivity of SrTiO₃-epoxy composite for various SrTiO₃ content and (b) the complex permeability of SrTiO₃-epoxy composite for various SrTiO₃ content.

진주파수는 2.73 GHz이며 2차 공진은 약 7 GHz에서 일어나는 것을 알 수 있다. 복소투자율의 실수값은 약 3 GHz까지 1.5 정도의 값을 갖으며 허수값은 0.5이하의 작은 값을 나타낸다. 3-5 GHz에서 $\tan \delta (= \mu''/\mu')$ 값이 1 이상을 갖는다.

Fig. 2(a)는 SrTiO₃ 함량에 따른 SrTiO₃-에폭시 복합재료의 복소유전율의 주파수 분산거동을 나타낸 것이다. SrTiO₃ 함량이 증가함에 따라 복합재료의 복소유전율 실수값이 증가하고, 복소유전율 허수부의 최대값을 나타내는 주파수, 즉 공진주파수는 SrTiO₃ 함량이 증가함에 따라 9.73, 7.63, 6.63, 4.93 GHz로 낮아지며, 허수부의 피크값이 증가하는 것을 알 수 있다. Fig. 2(a)의 결과로 미루어 공진주파수와

유전율 실수값은 서로 반비례 관계가 있음을 알 수 있다. Fig. 2(b)는 SrTiO₃ 함량에 따른 SrTiO₃-에폭시 복합재료에 대한 복소투자율의 주파수 의존성을 나타낸 것이다. 복소투자율 실수값은 0.5에서 1.5사이의 값을 가지나 복소투자율 허수값은 SrTiO₃ 함량에 따라 변화폭이 실수값에 비해 큰 폭으로 변하는 것을 알 수 있다. $\tan \delta (= \mu''/\mu')$ 값이 1보다 커지는 주파수는 SrTiO₃ 함량이 0.3, 0.5 그리고 0.6으로 증가함에 따라 각각 9.73, 6.63, 4.93으로 감소한다. 이들 주파수는 복합재료의 복소유전율의 공진주파수로, 이를 전후로 하여 복소유전율의 주파수 분산 거동 뿐만 아니라 복소투자율의 주파수 분산 거동도 크게 변화되는 것을 알 수 있다.

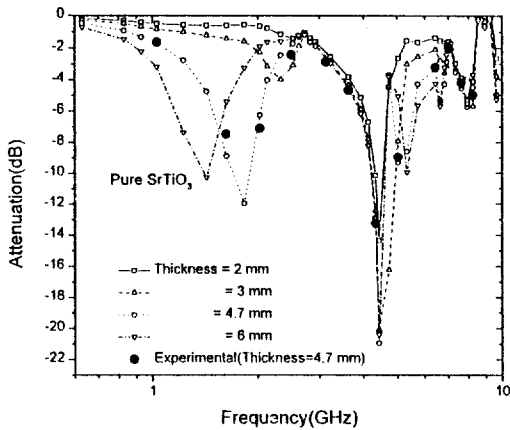
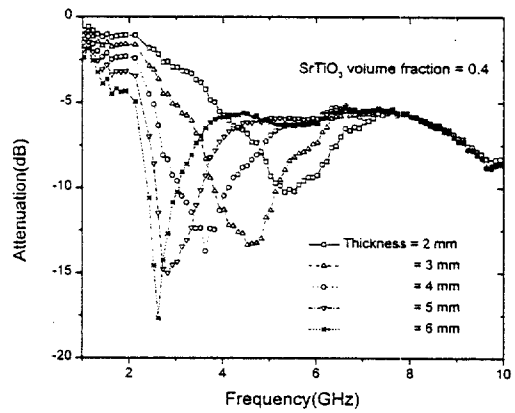


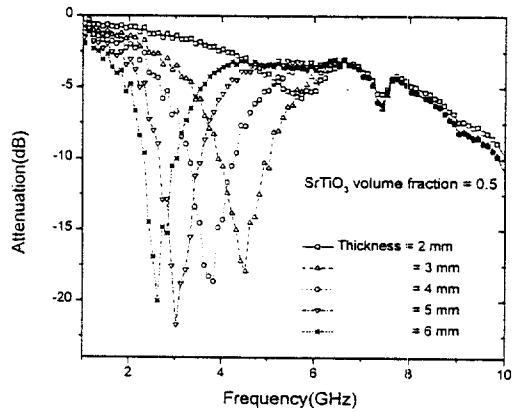
Figure 3. The attenuation behavior of pure SrTiO₃ for various thickness.

Fig. 3은 소결체 SrTiO₃의 두께 변화에 따른 전자파 흡수 특성을 나타낸 것이다. 닫힌 원 ●는 전자파 흡수 특성의 측정 결과이며, 각각의 라인들은 복소투자율과 복소유전율의 주파수 특성을 알고 있을 때 식 (2)와 (3)에 의해 계산된 흡수능을 나타낸 것으로, 두께 4.7 mm인 시편에 대한 실험값과 계산값이 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 전자파 흡수 특성은 흡수체의 복소유전율과 복소투자율의 주파수 특성을 알고 있으면 두께 변화에 따른 흡수능을 계산에 의해 구하여도 무방함을 보여준다. 두께 4.7과 6 mm의 경우 전자파 감쇠효과가 -10 dB이상의 값을 갖는 주파수 대역이 1-2 GHz와 4-5 GHz의 두 대역에서 나타나는 것을 알 수 있다. 1-2 GHz 대역에서의 전자파 흡수 특성은 복소유전율 변화에 의해 나타나는 것이며, 4-5 GHz 대역에서의 피크는 복소투자율 변화와 소결체 SrTiO₃의 복소유전율의 공진이 2차에 걸쳐 일어나기 때문으로 볼 수 있다. 공진이 일어나기 전의 복소유전율이 증가하게 되는 주파수 대역에서 전자파 흡수 특성이 나타나는 것을 이 그림을 통해 알 수 있다. 이러한 경향은 소결체 뿐만 아니라 복합재료의 경우도 동일한 결과를 갖는다. 한편, 3 mm이하의 전자파 흡수체의 두께에 대해서는 측정주파수 대역에서 전자파 감쇠가 매우 약하게 나타나는 것을 알 수 있다.

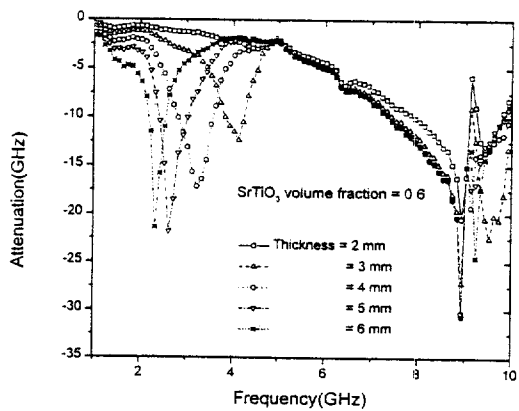
SrTiO₃ 함량이 0.4, 0.5 그리고 0.6인 복합재료의 두께에 따른 전자파 흡수 특성을 각각 Fig. 4(a), (b)와 (c)에 나타내었다. 두께가 증가함에 따라 전



(a)



(b)



(c)

Figure 4. The attenuation behavior of composites for various thickness.

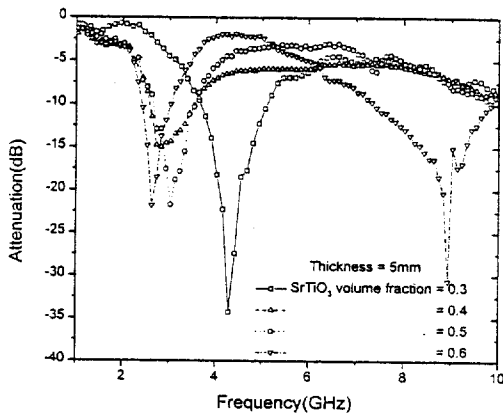


Figure 5. The attenuation behavior of composites for various SrTiO₃ volume fraction.

자파 흡수능의 피크값이 낮은 주파수 대역으로 이동하고, 피크의 폭이 점차 좁아지는 것은 세 가지 경우 모두 동일하다. 그러나 각 복합재료의 공진주파수 이상에서의 거동을 살펴보면, SrTiO₃ 함량이 0.4이하의 복합재료의 경우 공진주파수 (7.63 GHz) 이상에서 전자파 흡수 특성은 두께의 변화를 아무리 변화시켜도 변화가 없이 일정한 값을 유지한다. 이는 Choi 등⁸ 의한 카본블랙-에폭시 복합재료 경우의 전파 흡수 특성 곡선과 동일한 결과를 나타내고 있다. SrTiO₃ 함량이 0.5의 경우 공진주파수 이상에서 두께 3 mm이상의 경우 같은 전자파 흡수 특성을 나타내지만 2 mm의 경우 다른 전자파 흡수 특성이 나타났다. 이런 경향은 SrTiO₃ 함량이 0.6인 복합재료에서 두드러지게 나타났으며, 즉 공진주파수 이상의 주파수 대역에서 전자파 흡수 특성은 두께 변화에 따라 일정한 값을 가지지 못하며 완전히 다르게 거동함을 알 수 있다. 이는 SrTiO₃ 함량이 증가함에 따라 복소투자율의 분산거동이 나타나든지 혹은 복소유전율의 공진현상이 더 높은 주파수 대역에서 한번 더 나타날 수 있다는 것을 예측할 수 있는 결과를 나타낸다. SrTiO₃ 함량이 0.6인 복합재료의 경우 Fig. 2(b)를 보면 4 GHz 이상의 주파수 대역에서 복소투자율의 분산거동이 나타나기 시작하며 복소투자율 허수부의 최대값이 약 8.9 GHz이며, Fig. 4(c)에서 보면, 전파 흡수능 곡선의 두 번째 피크가 이 주파수에서 나타나는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 일정한 두께에서 SrTiO₃ 함량에 따른 복

합재료의 전자파 흡수 특성을 나타낸 것이다. 전자파 흡수능의 피크값이 나타나는 중심주파수는 낮은 주파수 대역으로 이동한다. 특히 SrTiO₃ 함량이 0.6인 복합재료의 경우는 감쇠능의 피크가 2 GHz와 9 GHz의 두 대역에서 나타나며, -20 dB를 기준으로 하여 함량에 따른 비교를 하면 함량이 증가함에 따라 감쇠대역 폭이 좁아지는 것을 알 수 있다. 또한 SrTiO₃ 함량이 0.3이고 두께가 5 mm인 복합재료의 경우 4 GHz 주파수 대역에서 우수한 감쇠특성을 보이므로 전자파 흡수체로 사용할 수 있다.

결 론

SrTiO₃-에폭시 복합재료의 전자기적 특성과 전자파 흡수 특성에 대하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

복합재료의 복소유전율과 복소투자율은 SrTiO₃ 함량이 증가함에 따라 증가하고 공진주파수가 낮은 주파수 대역으로 이동하는 것을 알았다. 복소유전율과 복소투자율은 주파수에 따른 분산 거동을 나타내었다. SrTiO₃-에폭시 복합재료의 전자파 흡수 거동은 SrTiO₃의 함량과 두께가 증가함에 따라 감쇠곡선의 중심주파수가 낮은 주파수 대역으로 이동하는 특성을 나타내었다. 전자파 흡수 특성은 소결체나 복합재료의 경우 모두, 복소투자율과 복소유전율의 주파수 분산 거동과 밀접한 관계가 있고, SrTiO₃ 함량이 증가함에 따라 감쇠곡선의 피크값이 2개 이상의 주파수 대역에서 존재하는 것을 알 수 있었다. SrTiO₃ 함량이 0.4이하인 복합재료의 경우 공진주파수 이상의 주파수 대역에서는 전파 흡수 특성이 두께와 무관하다는 것을 알았다.

참 고 문 헌

1. V. Hombach, K. Meier, M. Burkhardt, E. Kuhn, and Kuster, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **44**(10), 1865 (1996).
2. Y. Naito, J. Yin, and T. Mizumoto, *Inst. Elec. Commun. Eng. Jpn.*, **J70-C**(8), 1141 (1987).
3. T. Kobayashi, T. Nojima, K. Yamada, and S. Uebayashi, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **41**

- (1), 136 (1993).
4. T. H. Kim, J. R. Park, S. J. Lee, H. K. Sung, S. S. Lee, and T. G. Choy, *ETRI Journal*, **18**(1), 15 (1996).
5. H. D. Choi, W. S. Kim, I. S. Joon, H. G. Yoon, and T. J. Moon, *Polymer(Korea)*, **21**(1), 112 (1997).
6. A. M. Nicolson and G. F. Ross, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **IM-19**, 377 (1970).
7. Y. Naito and K. Suetake, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **MTT-19**(1), 65 (1971).
8. H. D. Choi, K. Y. Cho, S. Han, H. G. Yoon, and T. J. Moon, *Polymer(Korea)*, **21**(1) 119 (1997).