

## 나노결정 $\text{Fe}_{73}\text{Si}_{16}\text{B}_7\text{Nb}_3\text{Cu}_1$ 연자성분말과 숯분말 혼합 복합성형체의 전자파흡수 특성

김선이 · 김미래 · 손근용 · 박원욱\*  
인제대학교 나노시스템공학과

### Electromagnetic Wave Absorption Properties of $\text{Fe}_{73}\text{Si}_{16}\text{B}_7\text{Nb}_3\text{Cu}_1$ -Based Nanocrystalline Soft Magnetic Powder Composite Mixed with Charcoal Powder

Sun-I Kim, Mi-Rae Kim, Keun Yong Sohn and Won-Wook Park\*

Department of Nano System Engineering, Inje University, 607 Obang-dong Gimhae,  
Gyungnam, 621-749 Republic of Korea

(Received July 3, 2009; Revised July 22, 2009; Accepted August 5, 2009)

**Abstract** The electromagnetic wave absorption sheets were fabricated by mixing of  $\text{Fe}_{73}\text{Si}_{16}\text{B}_7\text{Nb}_3\text{Cu}_1$  nanocrystalline soft magnetic powder, charcoal powder and polymer based binder. The complex permittivity, complex permeability, and scattering parameter have been measured using a network analyzer in the frequency range of 10 MHz~10 GHz. The results showed that complex permittivity of sheets was largely dependent on the frequency and the amount of charcoal powder : The permittivity was improved up to 100 MHz, however the value was decreased above 1 GHz. The power loss of electromagnetic wave absorption data showed almost the same tendency as the results of complex permittivity. However, the complex permeability was not largely affected by the frequency, and the values were decreased with the addition of charcoal powder. Based on the results, it can be summarized that the addition of charcoal powder was very effective to improve the EM wave absorption in the frequency range of 10 MHz~1 GHz.

**Keywords** : Electromagnetic wave absorber,  $\text{FeSiBNbCu}$ , Charcoal, Complex permittivity

#### 1. 서 론

최근 전자기기의 종류는 다양해지고 크기는 소형화되고 있는 추세이며, 이에 따라 전자파의 발생원도 증가하고 있다. 이러한 전자파는 의료기기의 오작동과 아울러 비행기에 전파장해를 일으키거나 또는 인체 내의 호르몬 분비체계나 면역세포에 영향을 줄 뿐만 아니라 조직세포의 온도를 비정상적으로 상승시킨다[1-2].

전자기파에 대한 많은 문제가 제기 되면서 국내에서는 한국공업규격(KS)에 의거하여 전자파를 발생하는 제품자체에서 그 한계를 정하여 제품을 생산하도

록 규정하고 있으며, 선진국에서는 전자파 발생을 제한하는 규제(EMI, electromagnetic interface)뿐만 아니라 외부로부터 전자파를 받아들여도 오동작을 일으키지 않도록 하는 전자파 내성(EMS, electromagnetic susceptibility)까지도 제품의 규격에 포함시킬 것을 검토하고 있다.

전자기파가 인체 내에 미치는 영향과 전자기기의 오작동을 유발하는 전자기파의 피해를 최소화하기 위해 현재 판매되고 있는 대부분의 제품은 전자파를 차폐하는 방식이다. 그러나 전자파 차폐의 경우에는 기계가 소형화됨에 따라 내부회로의 크기가 작아져 반사된 전파가 내부 부품에 전파 장해를 유발할 수도

\*Corresponding Author : [Tel : +82-55-320-3872; E-mail : wwpark@inje.ac.kr]

있다. 따라서 전자파를 차폐하는 방법보다 전자파 감쇠 및 반사억제 할 수 있는 전파흡수체가 보다 효과적이다.

전자파 흡수체는 유전손실, 자성손실, 도전손실에 의하여 전자파 에너지를 열에너지로 전환시켜 전자파를 흡수한다. 폴리머에 탄소나노튜브(CNT, Carbon Nanotube), 카본블랙(Carbon black), 금속 분말을 첨가하여 제작한 전자파 흡수체가 대표적인 유전손실을 이용한 흡수체[3-6]이며, 퍼멀로이, 센더스트, 페라이트와 같은 고 투자율의 자성분말을 이용한 전자파 흡수체는 자성손실을 이용한 것이다[7-9]. 하지만 이러한 흡수체의 경우, 유전손실을 이용한 흡수체는 높은 유전율의 값을 가지는 반면 낮은 투자율의 값을 가지고, 자성손실을 이용한 흡수체는 높은 투자율의 값을 가지는 반면 낮은 유전율의 값을 가진다. 또한 보편적으로 쓰이고 있는 CNT의 경우, 가격이 비싸고 분산이 힘든 이유[10]로 인하여 본 연구에서는 고투자율의 연자성 재료인  $Fe_{73}Si_{16}B_7Nb_3Cu$ 에 폴리머와 가격이 저렴하고 친환경적인 숯을 첨가함으로써 전자파 흡수 특성에 미치는 영향에 대해 상세히 연구하였다.

## 2. 실험 방법

본 실험에서는 급속냉각응고법으로  $Fe_{73}Si_{16}B_7Nb_3Cu$ 의 비정질 리본을 제조하였으며, 제조된 리본은 jet mill을 이용하여 파쇄한 후 와전류 손실을 줄이기 위하여 attrition mill을 이용하여 편상화시켰다. 편상화된 분말은 270 mesh의 체가름기를 이용하여 54  $\mu m$  이하 크기의 분말을 분급한 후 540°C에서 1시간 동안 질소분위기에서 열처리 과정을 거쳐 비정질 재료를 낮은 보자력과 고투자율을 가지는 나노 결정립의 연자성 분말로 제조하였다[11-12]. 본 실험에서 나노결정립 연자성재료에 숯분말의 첨가는 자성분말에 숯가루의 첨가량을 10 wt%~50 wt%로 변화를 주어 ball mill을 이용하여 1시간 동안 혼합하였다. 혼합된 분말에 바인더와 시너의 비를 전체 혼합된 분말의 40%의 부피비로 첨가하여 교반기를 사용하여 2분간 혼합하여 슬러리 상태로 만든 후 다이 캐스팅기를 이용하여 두께 약 1 mm의 분말시트로 제작하였다. 제작된 흡수체 시트는 100°C인 건조기에서 1시간 동안 건조과정을 거친 후 상온에서 24시간 다

시 한번 더 건조시켰다. 건조된 시트는 시트 두께의 균일성을 향상시키기 위하여 70°C에서 압연(Rolling) 과정을 거쳐 흡수 시트의 두께를 평균 0.5 mm로 제작하였다. 제작된 전자파 흡수시트의 복소 유전율과 복소 투자율을 분석하기 위하여 전자파 흡수체를 내경 3 mm/외경 7 mm의 링 모양으로 시료를 가공한 후 네트워크 어날라이저(network analyzer), (AgilentCo. N5230A)의 2-port coaxial 방법을 이용하여 측정하였고, 전자파 흡수시트의 흡수능은 시트를 가로 세로 각각 5 cm인 사각형의 시트로 잘라 마이크로스트립 라인(micro-strip line)방법을 이용하여 10 MHz~10 GHz의 주파수 범위에서  $S_{11}$ 과  $S_{21}$ 을 측정할 후 수식을 이용하여 평가하였다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

그림 1과 2는 나노결정 연자성분말시료에 숯분말을 첨가하여 제조한 전자파 흡수시트의 주파수에 따른 복소 유전율( $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$ ) 특성을 나타낸 것이다. 그림 1에 나타낸 바와 같이 100 MHz 대역 이전에서는 숯가루의 첨가량을 증가함에 따라 비례적으로 실수유전율이 증가하였으나 100 MHz 이상에서는 첨가량에 반비례적으로 실수 유전율이 감소하였다. 에너지를 저장하는 역할을 하는 실수유전율과 에너지의 손실을 나타내는 허수유전율이 서로 상호관계를 가지고 있기 때문에[13], 그림 2의 허수유전율 또한 1 GHz 대역 이전까지 첨가량에 따라 급격히 증

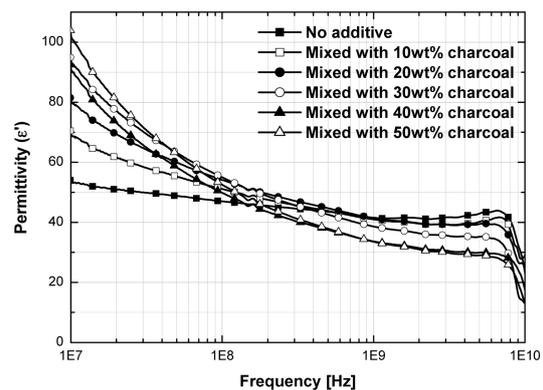


Fig. 1. The real part of complex permittivity curves plotted against frequency for the Fe-based EM wave absorption sheets mixed with 10~50 wt% charcoal powder in the 10 MHz~10 GHz range.

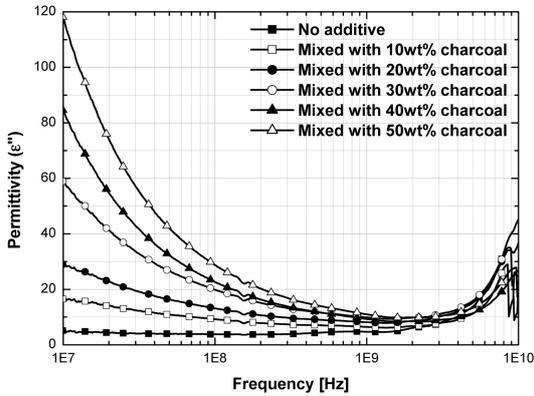


Fig. 2. The imaginary part of complex permittivity curves plotted against frequency for the Fe-based EM wave absorption sheets mixed with 10~50 wt% charcoal powder in the 10 MHz~10 GHz range.

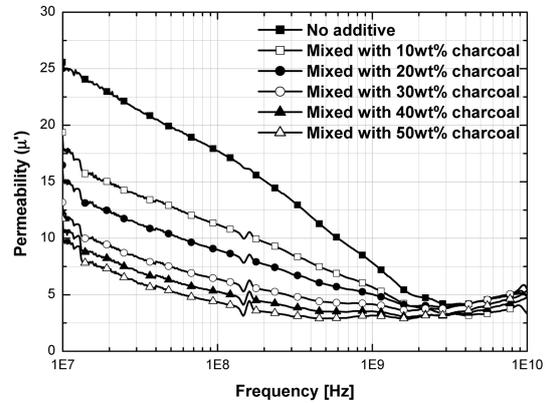


Fig. 3. The real part ( $\epsilon'$ ) (a) of complex permittivity curves plotted against frequency for the Fe-based EM wave absorption sheets mixed with 10~50 wt% charcoal powder in the 10 MHz~10 GHz range.

가하였으나 더 고주파 대역으로 이동함에 따라 실수 유전율과 같이 허수유전율이 급격히 감소하였다.

복소 유전율이 100 MHz 대역 이전의 경우 숯의 첨가량에 따라 상승하는 이유는 높은 전도도를 나타내는 숯의 분말이 절연체인 폴리머에 둘러싸여 계면분극 현상을 유발[14-15]하게 되는데, 이에 따라 유전율의 값이 증가한 것으로 사료된다. 하지만 1 GHz 이상의 고주파 대역으로 주파수가 이동함에 따라 복소 유전율이 크게 감소하는데 이는 숯의 고유 특성 상 유전율의 값이 고주파로 이동함에 따라 유전율이 급격히 감소하는 특성[6, 16]을 나타내고 있기 때문인 것으로 생각된다. 전자파 흡수체내에 숯의 첨가량이 증가할수록 전체 시트내에 유전체의 역할을 하는 부분도 증가하게 되어 그에 따른 주파수의 영향을 더 많이 받게 되면서 주파수의 따른 유전율의 기울기가 커지는 것으로 판단된다.

그림 3, 4는 주파수에 따른 복소 투자율( $\mu_r = \mu' - j\mu''$ )을 나타낸 것으로서, Fe계 나노결정립 연자성 분말에 숯가루의 첨가량이 증가함에 따라 실수 및 허수 투자율 값이 모두 감소하였다. Fe계 나노결정립 연자성분말에 숯을 첨가함에 따라 상대적으로 시트내에 자성분말의 부피 분율이 감소하고 이에 따라 높은 투자율을 나타내는 자성재료의 양이 줄어들게 되어 전자파 흡수 시트의 복소 투자율이 감소한 것으로 사료된다. 하지만 숯의 첨가량에 따라 허수투자율 값은 크게 변화하지 않는 것으로 나타났다. 자성재료의 허수 투자율은 주파수의 증가에 따라 감소하는 특

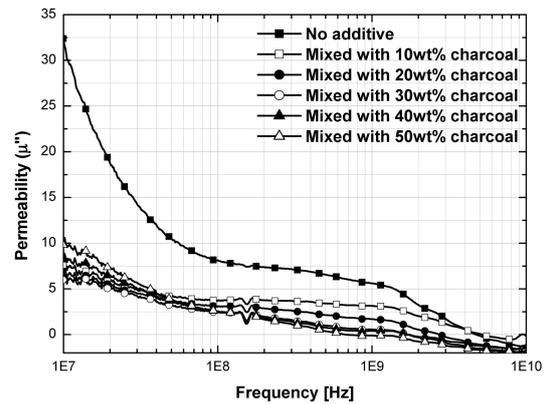


Fig. 4. The imaginary part of complex permittivity curves plotted against frequency for the Fe-based EM wave absorption sheets mixed with 10~50 wt% charcoal powder in the 10 MHz~10 GHz range.

성을 나타내는데 숯의 첨가량이 증가할수록 시트의 전기저항 값이 줄어들게 되어 높은 와전류 손실의 값을 나타낸다. 따라서 첨가량에 따라 와전류 손실의 증가로 허수부 투자율이 크게 변화하지 않은 것으로 판단된다.

전자파 흡수체의 흡수능 평가에 앞서 Network Analyzer의 마이크로 스트립 라인으로 S-parameter를 측정된 결과를 그림 5, 6에 나타내었다. 그림 5의 결과는 Fe계 분말에 숯의 첨가량을 증가함에 따라 반사가 증가한다는 사실을 나타냈는데, 이는 높은 전도도를 가지는 숯의 양이 증가함에 따라 전자파 흡

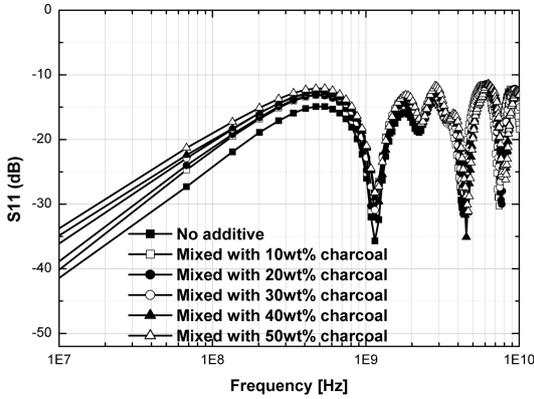


Fig. 5.  $S_{11}$  of electromagnetic wave absorption sheets mixed with 10~50 wt% charcoal powder in the 10 MHz~10 GHz range.

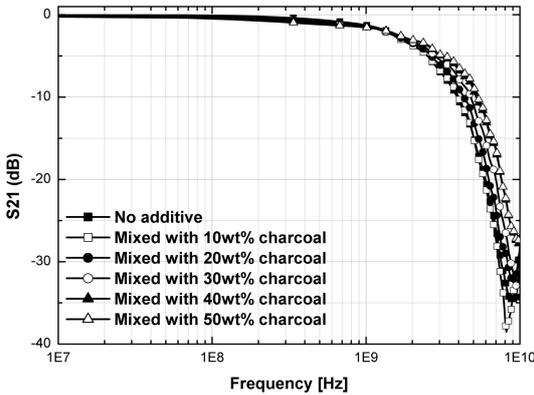


Fig. 6.  $S_{21}$  of electromagnetic wave absorption sheets mixed with 10~50 wt% charcoal powder in the 10 MHz~10 GHz range.

수체시트의 전기전도도가 증가하게 되고 따라서 시트의 표면에 와전류가 크게 발생하게 되어 표피깊이 (Skin depth)가 줄어들어 결과적으로 반사 값이 증가한 것으로 사료된다. 또한 에너지 저장 역할을 하는 실수 유전율이 증가했다는 것은 자성체 표면에 축적된 전하량이 증가하여 상대적으로 매질 내로 들어가는 전자파의 양이 감소한 것도 기인한다[16].

그림 6의 결과는 숯의 첨가량을 증가함에 따라 1 GHz 이상의 고주파 대역에서 흡수의 특성이 떨어지는 것으로 나타났다. 이 결과의 원인으로서는 숯을 첨가한 시트의 복소 유전율의 값이 주파수의 영향을 받아 고주파 대역에서 복소 유전율의 값이 크게 감소한 것과 숯의 첨가로 인한 Fe계 나노결정립 연자성 분말의

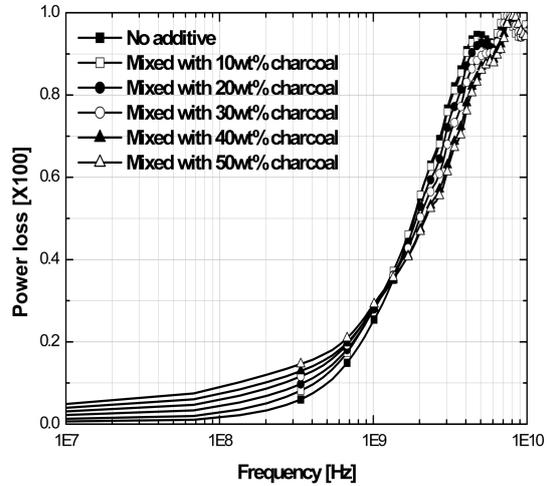


Fig. 7. Power loss curve for the Fe-based nanocrystalline soft magnetic powder sheets mixed with 10~50 wt% charcoal powder in the 10 MHz~10 GHz range.

부피 감소에 따른 복소 투자율의 감소로 인하여 흡수율이 떨어지게 나타나게 된 것으로 사료된다.

전자파 흡수체의 흡수율은 위의 S-parameter의 값을 통하여 계산하여 얻을 수 있으며, 그 결과는 그림 7에 나타내었다. 1 GHz 이하의 주파수 대역에서 흡수능은 숯의 첨가량에 비례하여 증가하였으나, 1 GHz 이상의 고주파수 대역으로 이동함에 따라 숯의 첨가량이 증가할수록 흡수능이 떨어지는 특성을 보였다. 실험결과를 종합해 보면, 100 MHz 이하의 주파수 대역에서 복소 투자율은 숯 분말 첨가량에 따라 감소하였으나 복소 유전율이 큰 폭으로 증가하여 결과적으로 1 GHz 이하의 주파수 대역에서는 흡수능이 증가한 것으로 판단된다. 또한, 100 MHz 부근의 주파수 범위에서는 숯분말의 첨가효과가 나노결정 연자성분말보다 더 큰 것으로 나타났다. 이와 반대로 1 GHz 이상의 고주파 대역에서는 주파수의 영향을 크게 받은 복소 유전율의 급격한 감소로 인하여 전자파흡수체의 흡수능이 감소한 것으로 사료된다.

#### 4. 결 론

$Fe_{73}Si_{16}B_7Nb_3Cu_1$ 의 나노 결정립 연자성 분말에 높은 전도도를 가지는 숯분말을 10~50 wt%범위에서 첨가하여 성형한 전자파 흡수체의 연구 및 실험결과 는 다음과 같다.

1. 연자성분말재료를 기초로 한 전자파흡수체에 있어 숯분말의 첨가량이 증가함에 따라 100 MHz이하의 주파수 대역에서 전자파 흡수시트의 복소 유전율과 전자파 흡수능이 크게 향상 되었다. 그러나, 1 GHz 이상의 주파수 대역에서는 실수와 허수 유전율 모두 주파수에 영향을 크게 받아 오히려 숯의 첨가량을 증가시킴에 따라 유전율이 낮아졌으며, 전자파 흡수능도 감소하였다.

2. 숯의 첨가량을 자성재료의 전자파 흡수체에 늘림에 따라 상대적인 자성재료의 양이 감소하게 되었고 그에 따라 투자율이 감소하였다.

3. 100 MHz 부근의 주파수 범위에서는 숯분말의 첨가효과가 나노결정 연자성분말보다 더 큰 것으로 나타났다.

### 참고문헌

- [1] Taflove, A. and Brodwin, M. E.: IEEE Trans. Microwave Theory Tech., **23** (1975) 888.
- [2] Jarupat, S., Kawabata, A., Tokura, H., Borkiewicz, A.: J. Physiol Anthropol, **22** (2003) 61.
- [3] Abbas, S. M., Chandra, M., Verma, A., Chatterjee, R., Goel, T. C.: Composites: Part A, **37** (2006) 2148.
- [4] Zhihua, P., Jingcui, P., Yanfeng, P., Yangyu, O., Yantao, N.: Phys. Lett. A, **372** (2008) 3714.
- [5] Sangawar, V. S., Chikhalikar, P. S., Dhokne, R. J., Ubale, A. U. and Meshram, S. D.: Bulletin of Materials Science, **29** (2006) 413.
- [6] Moon, K. S., Choi, H. D., Lee, A. K., Cho, K. Y., Yoon, H. G. and Suh, W. S.: J. Appl. Poly. Sci., **77** (2000) 1294.
- [7] Yoshisa, S., Sato, M., Sugawara, E. and Shimada, Y.: J. Appl. Phys., **85** (1999) 4636.
- [8] Hong, S. H., Sohn, K. Y., Park, W. W., Nam, J. M., Moon, B. G., Song, Y. S.: J. Korean Powder Metallurgy Institute, **14** (2007) 261.
- [9] Min, E. H., Kim, M. S., Koh, J. G.: J. Korean Magnetics Society, **17** (2007) 238.
- [10] Esawi, A. and Morsi, K., Composites: Part A, **38** (2007) 646.
- [11] Yoshizawa, Y., Oguma, S. and Yamauchi, K.: J. Appl. Phys., **64** (1988) 6044.
- [12] Petzold, J.: J. Magn. Magn. Mater., **242** (2002) 84.
- [13] Fenske, K. and Misra, D.: Appl. Microwaves Wireless, **12** (2000) 92.
- [14] Davis, L. C.: J. Appl. Phys., **72** (1992) 1334.
- [15] Jung, J. C., Jang, Y. G. and Yoon, H. G.: The Korean Society of Industrial Application, **5** (2006) 27.
- [16] Barba, A. A., Lamberti, G., d'Amore, M. and Acierno, D.: Poly. Bull., **57** (2006) 587.
- [17] Lee, K. S., Yoon, Y. C., Choi, G. B., Kim, S. S. and Lee, J. Y.: J. Korea Electromagnetic Engineering Society, **16** (2005) 228.