

철계 연자성 합금 분말을 함유한 고무 복합재의 전파흡수특성

조한신 · 김성수*
충북대학교 신소재공학과

Microwave Absorbing Properties of Rubber Composites Containing Soft Magnetic Fe-Alloy Particles

Han-Shin Cho and Sung-Soo Kim*

Department of Advanced Materials Engineering Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea
(Received March 11, 2013; Accepted April 15, 2013)

Abstract Magnetic and dielectric properties of rubber composites are controlled by using two kinds of high-permeability metal particles with different electrical conductivity (Sendust, Permalloy), and their effect on microwave absorbance has been investigated, focusing on the quasi-microwave frequency band (0.8-2 GHz). Noise absorbing sheets are composite materials of magnetic flake particles of high aspect ratio dispersed in polymer matrix with various filler amount of 80-90 wt.%. The frequency dispersion and magnitude of complex permeability is almost the same for Sendust and Permalloy composite specimens. However, the complex permittivity of the Permalloy composite ($\epsilon_r' \approx 250$, $\epsilon_r'' \approx 50$) is much greater than that of Sendust composite ($\epsilon_r' \approx 70$, $\epsilon_r'' \approx 0$). Due to the large dielectric permittivity of Permalloy composite, the absorbing band is shifted to lower frequency region. However, the investigation of impedance matching reveals that the magnetic permeability is still small to satisfy the zero-reflected condition at the quasi-microwave frequency band, resulting in a small microwave absorbance lower than 10 dB.

Keywords: Sendust, Permalloy, Microwave absorbers, Magnetic composites.

1. 서 론

오늘 날 정보통신 산업의 비약적인 발전은 디지털 회로 기술에 의한 정보처리속도의 고속화(고주파 화)와 IC 기술에 의한 고집적화(소형화 및 모바일 화)로 특징지어진다. 이와 같은 고속화, 고밀도 디지털 회로기술은 휴대전화, 무선 LAN, 모바일 단말기, 디지털 통신 등에 확대되고 있으며 대부분 GHz 대의 고주파를 이용한다. 최근에 이동통신 단말기, 노트북 PC 등 디지털 전자기기가 범용화 되면서 관심 주파수대역이 0.8-2 GHz 부근의 준 마이크로파 대역으로 집중되고, 이들 전자 및 통신기기에서 발생되는 노이즈 감쇠용 전파흡수체에 대한, 특히 박형화에 대한 연구가 최근에 와서 활발히 진행되고 있다[1,2]. 특히 이중 최대의 시장을 형성하고 있는 이동통신 단말기에 들어가는 전자파 감쇠용 전파흡수체로서 요구되는 가장 중요한 특성은

통신주파수에서 전자파 흡수율이 커야 함은 물론, 무엇보다도 두께가 박형이어야 한다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 철계 연자성 금속 입분체를 폴리머 매트릭스에 분산시킨 복합재료가 관심을 끌게 한다 [3-5]. 페라이트에 비해 포화자화가 2 배 이상 크기 때문에 GHz 대역에서 보다 큰 투자율을 얻을 수 있는 장점이 있다 [6-8]. 더구나 금속분말을 절연 매트릭스와 적층할 경우, 페라이트 대비 전하축적 능력이 우수함으로 (따라서 공간전하 분극이 큼) 상대적으로 매우 높은 유전율을 가지며, 이는 흡수체의 두께를 줄이는 데 효과가 크다[9, 10].

본 연구에서는 디지털 전자기기에서 요구하고 하고 있는 박형 전파흡수체의 제작을 목표로 고무자율 자성 sheet의 전파흡수능 시험평가에 관한 연구를 수행하였다. 고무자율 철계 자성분말로 Sendsut(Al 5%, Si 10%, Fe 85%)와 Permalloy(Ni 45%, Fe 55%), 2 종류를 선택하고, 이들

*Corresponding Author : Sung-Soo Kim, TEL: +82-43-261-2418, FAX: +82-43-271-3222, E-mail: sskim@cbnu.ac.kr

압분체의 종류 및 함량에 따른 고주파 전자기 특성(복소 투자율, 복소유전율) 및 전파흡수특성에 대해 조사하였다.

2. 사용재료 및 실험방법

본 연구에 사용된 흡수재 원료는 Sendust (Al 5%, Si 10%, Fe 85%)와 Permalloy (Ni 45%, Fe 55%), 2 종류이다. 이들 분말을 편상화 시킨 후 (압분체의 두께는 약 1 μm , 직경은 30-50 μm 정도), 고무에 혼입시킨 sheet형 복합재를 회사로부터 제공 받아 고주파 전자기 물성 (복소 투자율, 복소유전율)과 전파흡수특성을 조사하였다. 흡수재의 함량은 무게비로 80-90 wt.% 범위에서 변화시켰다. 복합재 sheet로부터 펀치를 이용하여 내경 3 mm, 외경 7 mm, 두께 0.25~1.01 mm의 측정용 시료를 제작하였다.

Network analyzer(HP8722D)와 동축 도파관을 이용하여 재료정수(복소투자율, 복소유전율)와 전파흡수특성을 측정하였다. 측정 주파수 범위는 0.5~6 GHz로 설정하였다. Nicolson 과 Ross[11]에 의하여 최초로 제안된 반사/투과 법은 반사산란계수 γ 와 투과산란계수 T 를 측정함으로써 흡수체의 복소유전율 ϵ_r 과 복소투자율 μ_r 을 계산하는 방법이다. 동축 케이블 혹은 구형 도파관을 이용하여 반사산란계수와 투과산란계수를 측정한 다음 식 (1)과 식 (2)를 이용하여 복소유전율 ϵ_r 과 복소투자율 μ_r 을 계산한다.

$$\gamma = \frac{\sqrt{\mu_r} - \sqrt{\epsilon_r}}{\sqrt{\mu_r} + \sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

$$T = \exp\left[-j\left(\frac{\omega}{c}\right)\sqrt{\mu_r\epsilon_r}d\right] \quad (2)$$

여기서 ω 는 각주파수, c 는 광속도, d 는 시편의 두께이다. 전파흡수능 실측은 복합재 시편의 배면을 금속으로 단락 시킨 후 반사계수를 측정함으로써 행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 복소투자율, 복소유전율

Fig. 1은 자성 복합재 (Sendust, Permalloy)의 복소투자율 ($\mu_r = \mu_r' - j\mu_r''$) 및 복소유전율 ($\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r''$)이다. 흡수재의 함량은 85 wt.%이었다. Fig. 1(a)는 Sendust 복합재의 복소투자율과 복소유전율을 보여준다. 복소투자율의 실수 (μ_r')는 주파수가 커짐에 따라 0.5 GHz의 12로부터 6 GHz의 0으로 급격히 감소하고, 허수 (μ_r'')는 약 6의 값으로 넓은 주파수 분산특성을 보인다. 복소유전율의 실수 (ϵ_r')는 70 정도의 값으로 주파수에 따라 거의 변동이 없는 것을 볼 수 있다. 복소유전율의 허수 (ϵ_r'')는 거의 0에 가까운 값을 보이고, 주파수 증가에 따라 약간 증가하는 경향을 보인다.

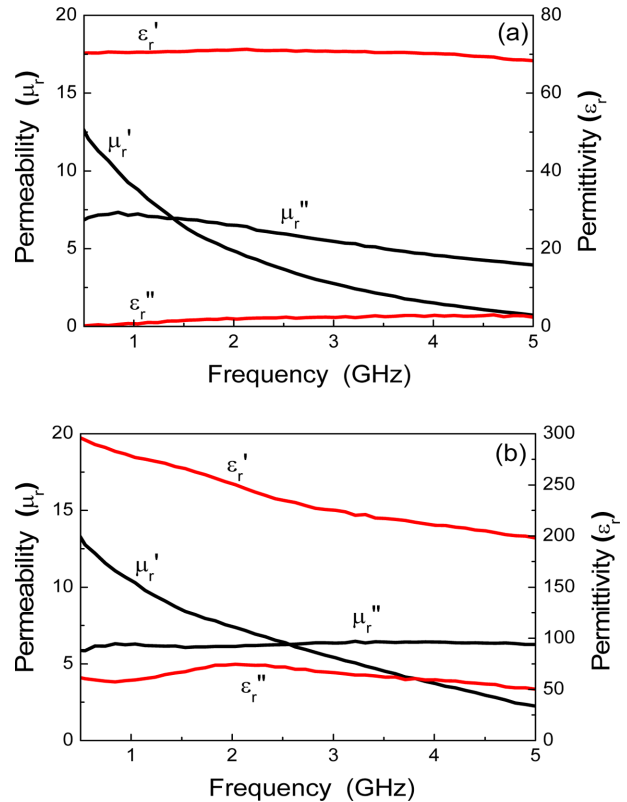


Fig. 1. Complex permeability and permittivity of magnetic composites: (a) Sendust, (b) Permalloy.

Fig. 1(b)는 Permalloy 복합재의 복소유전율과 복소투자율을 나타낸 것이다. 복소투자율의 실수와 허수는 Sendust 복합재와 비슷한 분산특성을 보인다. 복소투자율의 실수는 주파수 증가에 따라 급격히 감소하고, 허수는 거의 일정한 주파수 분산특성 ($\mu_r'' \sim 6$)을 보이고 있다. 반면 유전율은 Sendust 복합재에 비해 현저히 증가함을 볼 수 있다. 유전율의 실수는 주파수 증가에 따라 감소하는 경향을 보이나 200 이상의 높은 값을 보인다. 유전율의 허수 또한 50 정도의 큰 값을 보이고, 거의 일정한 주파수 분산특성을 보이고 있다.

이상 2 종류 자성 복합재의 경우 복소투자율의 주파수 분산특성은 거의 동일하나, 복소유전율의 경우에는 많은 차이를 보였다. Sendust에 비해 Permalloy 복합재의 유전율이 실수, 허수 모두 증가함을 볼 수 있다. 이러한 차이는 금속 충전제 분말의 전기전도도 차이에 기인하는 것으로 해석된다. Permalloy 분말의 전기전도도가 Sendust 분말에 비해 약 6배 정도까지 크다는 보고가 있다[10]. 전기전도도가 높을수록 공간전하 분극도가 증가하고, 따라서 유전율이 증가한다[7].

3.2. 전파흡수특성

배면이 도체로 단락된 자성복합재의 경우 복합재 표면에서 입력 임피던스 (Z_i)는 식 (3)과 같이 표시된다[12,13].

$$Z_i = Z_0 \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \tanh \left[\frac{j2\pi f d}{c} \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \right] \quad (3)$$

여기서 Z_0 는 자유공간에서의 파동 임피던스 ($=376.7 \Omega$), $j=\sqrt{-1}$, f 는 주파수, d 는 유전체의 두께, c 는 광속도이다. 반사손실(reflection loss)은 식 (4)와 같이 Z_i 과 Z_0 의 차이에 비례함으로 복소투자율과 복소유전율이 주어지면 반사손실을 주파수 및 두께의 함수로 계산할 수 있다.

$$reflection\ loss(dB) = 20 \log \left| \frac{Z_i - Z_0}{Z_i + Z_0} \right| \quad (4)$$

Fig. 2는 자성복합재의 재료정수로부터 계산된 전파흡수능을 나타낸 것이다. 복합재의 두께는 0.25~1.01 mm 범위에서 조절하였다. Sendust 복합재의 경우(Fig. 2(a)), 시편 두께가 증가할수록 흡수능은 증가하고 흡수 주파수 대역이 저주파로 이동함을 볼 수 있다. 두께 1.01 mm일 때 2.5 GHz에서 -7.5 dB의 최대 흡수능을 보인다. Fig. 2(b)는 Permalloy 복합재의 전파흡수능이다. Sendust 복합재에 비해 흡수 주파수 대역이 저주파로 이동함을 볼 수 있다. 두께 1.01 mm의 경우, 1.2 GHz에서 -6.5 dB의 최대 흡수능을 보인다.

Fig. 3은 두께를 1.01 mm으로 동일하게 했을 때 실측한 2종류 자성복합재의 전파흡수능을 비교한 것이다. Fig. 2에

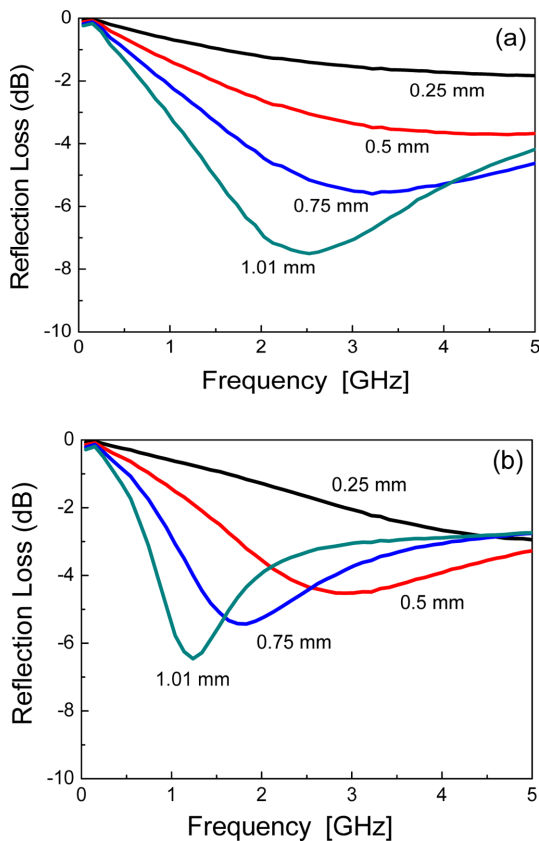


Fig. 2. Calculated reflection loss of magnetic composites with variation of sheet thickness: (a) Sendust, (b) Permalloy.

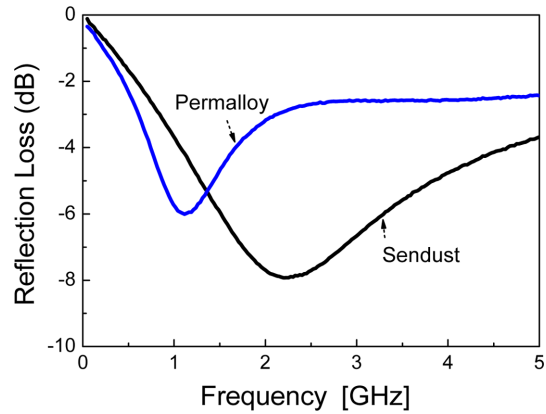


Fig. 3. Measured reflection loss of magnetic composites with a thickness of 1.01 mm.

제시한 계산치와 잘 일치함을 볼 수 있다. 흡수 주파수 대역이 Sendust, Permalloy의 순으로 저주파로 이동함을 볼 수 있다. 앞서 기술한 바와 같이 자성복합재의 복소투자율은 큰 차이가 없는 반면, 복소유전율은 Sendust, Permalloy의 순으로 증가하였다. 유전율이 증가할수록 흡수 주파수 대역을 저주파로 이동한다는 기존 연구결과[7,13]와 잘 일치한다.

그러나 금속 자성체 압분체를 사용한 전파흡수체의 경우, 최소 반사손실은 -10 dB(90% 전력흡수율)를 넘지 못하고 있다. 이는 투자율에 비해 유전율이 너무 높은 데 기인한다. 식 (1)로 표시되는 입력 임피던스의 허수가 0이 되고, 실수가 자유공간의 임피던스($=376.7 \Omega$)와 같아질 때 임피던스 정합이 일어나고, 반사손실은 최소가 된다(일반적으로 -20 dB 이하). 그러나 유전율이 투자율에 비해 너무 높은 경우 이러한 조건을 충족시키기 어렵다. 유전율의 실수가 200 이상인 Permalloy 복합재의 경우 흡수율이 더 떨어지는 원인이 여기에 있다. 금속 자성체 복합재의 흡수능을 올리기 위해서는 투자율을 증대시키는 방안(흡수재의 성분, 형상 및 함량)이 필요하다.

3.3. 흡수재 함량의 영향

Fig. 4는 Sendust 복합재의 충전제 함량 증가에 따른 투자율 및 유전율의 증가를 보여준다. 충전제의 함량이 무게 비로 80%에서 90%로 증가함에 따라 복소투자율의 실수, 허수 모두 증가한다(Fig. 4(a)). 저주파에서 증가 효과가 커 함량이 90%일 때 복소투자율의 실수 및 허수는 0.5 GHz에서 각각 $\mu_r'=20$, $\mu_r''=8$ 을 넘어서고 있다. 복소유전율의 경우에는 실수 값의 증가가 두드러진다. 80%일 때 $\epsilon_r'=52$ 로부터 90%일 때 $\epsilon_r'=90$ 으로 현격히 증가한다(Fig. 4(b)).

이와 같은 투자율 및 유전율의 증가는 Fig. 5에서와 같이 흡수 주파수대역을 저주파 대역으로 이동시키고, 흡수능의 증가를 가져온다. 충전제 함량이 80%일 때 최대 흡수능과 주파수는 각각 -7 dB, 3 GHz인 반면, 함량이 90%

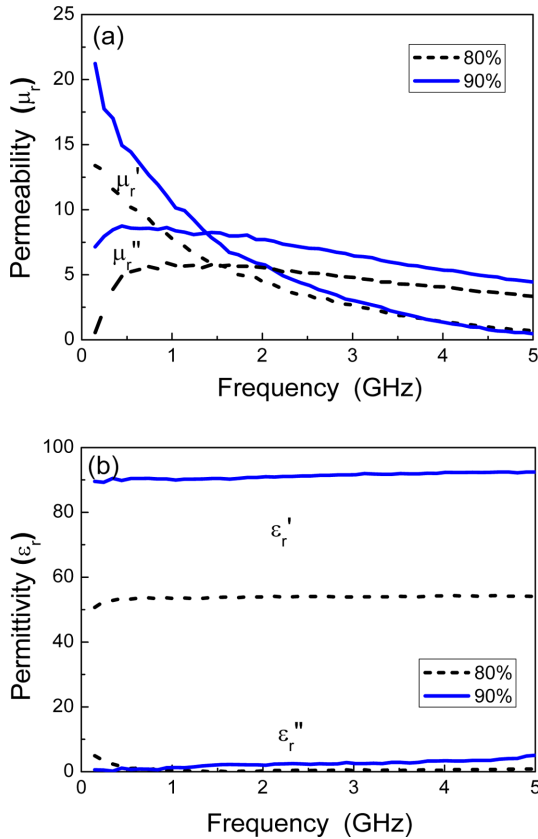


Fig. 4. Increase of material parameters with filler content in the Sendust composites: (a) complex permeability and (b) complex permittivity.

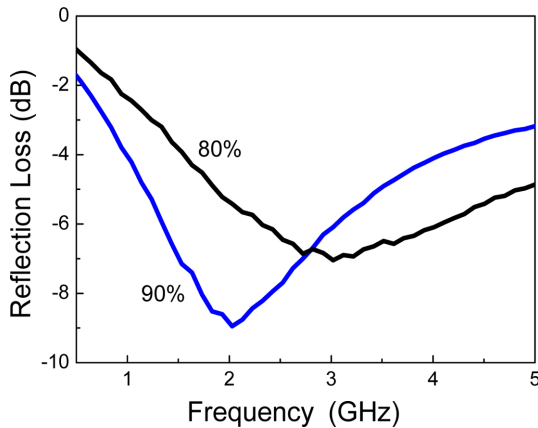


Fig. 5. The effect of filler content on microwave absorbing properties of Sendust composites.

로 증가하면 주파수대역은 2 GHz로 이동하면서 최대흡수능은 -9 dB로 증가함을 볼 수 있다.

5. 결 론

철계 연자성 압분체(Sendust, Permalloy)를 흡수 충전재로 사용함으로써 이동통신주파수 대역(0.8~2.0 GHz)에서

반사손실이 약 -7 dB(80% 전력흡수율), 두께가 1 mm 수준인 박형의 전파흡수체를 제시하였다. 이상 2 종류 압분체의 경우, 복소투자율의 주파수 분산특성은 큰 차이가 없는 반면, 압분체의 전기전도도의 증가에 따라 복소유전율은 크게 증가하였다. Sendust 복합재의 경우 $\epsilon_r'=70$, $\epsilon_r''=0$ 인 반면, 이에 비해 전기전도도가 큰 Permalloy의 경우 $\epsilon_r'=200$, $\epsilon_r''=50$ 의 큰 값을 보였다. 이와 같은 재료정수의 차이에 의해 흡수 주파수 대역을 조절할 수 있었다. 유전율이 증가할수록 흡수 주파수 대역은 저주파로 이동하였다. 그러나 금속 자성체 압분체를 사용한 전파흡수체의 경우, 최소 반사손실은 -10 dB(90% 전력흡수율)를 넘지 못하고 있다. 이는 투자율에 비해 유전율이 너무 커 임피던스 정합 조건을 만족시키지 못하는 데 기인한다. 투자율 증가 방안의 하나로 흡수재 함량을 증가시킨 결과, 흡수 대역은 저주파로 이동하면서 흡수능은 증가하는 실험결과를 얻을 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단의 지원(과제번호: 2010-0007988)과 2012년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의해 수행되었음.

참고문헌

- [1] M. Hirou: *Electromagnetic Shielding and Absorbing Practical Technology Practical Manual*, Mimatsu Co. Tokyo, 2006.
- [2] H. W. Ott: *Noise Reduction Techniques in Electronic Systems*, John Wiley & Sons, New York, 1975.
- [3] S. Yoshida, M. Sato, E. Sugawara and Y. Shimada: *J. Appl. Phys.*, **35** (1999) 4636.
- [4] M. Matsumoto and Y. Miyata: *IEEE Trans. Magn.*, **33** (1994) 4459.
- [5] O. Hashimoto, Y. Takase and S. Haga: *Trans. IEICE Japan*, **J86-B(1)** (2003) 113.
- [6] J. Smit and H. P. J. Wijn: *Ferrites*, Philips Technical Library, Eindhoven, 1959.
- [7] S.-S. Kim, S.-T. Kim, Y.-C. Yoon and K.-S. Lee: *J. Appl. Phys.*, **97** (2005) 10F905.
- [8] S.-T. Kim, H.-S. Cho and S.-S. Kim: *IEEE Trans. Magn.*, **41** (2005) 3562.
- [9] S. S. Kim, S. B. Jo, K. I. Gueon, K. K. Choi, J. M. Kim and K. S. Churn, *IEEE Trans. Magn.*, **27** (1991) 5462.
- [10] Y.-K. Park and K.-J. Yang, *J. Kor. Inst. Elect. & Electr. Mater. Eng.*, **9** (1996) 76.
- [11] A. M. Nicolson and G. F. Ross, *IEEE Trans. Instrum. Mes.* **19** (1970) 377.
- [12] Y. Naito and K. Suetake: *IEEE Trans. MTT.* **19** (1971) 65.
- [13] H. M. Musal, Jr. and H. T. Hahn: *IEEE Trans. Magn.* **25** (1989) 3851.