

Electromagnetic Wave Absorption Characteristics of Multi-Layered Magnetic Composites According to the Stacking Order

Young-Min Kang, Jae-Uk Kim, and Jae-Hee Heo

Department of Materials Science and Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju 27469, Korea

Sang-Min Lee*

Division of Creative Convergence, Korea National University of Transportation, Chungju 27469, Korea

(Received 14 November 2022, Revised in final form 21 December 2022, Accepted 21 December 2022)

The electromagnetic (EM) wave absorption characteristics of multi-stacked magnetic ceramic absorber-epoxy composites were studied. First, the M-type hexaferrite $\text{SrFe}_{12-2x}\text{Co}_x\text{Ti}_x\text{O}_{19}$ ($x = 1.1, 1.2, 1.3$) powders having different maximum absorption frequencies were synthesized, and 10 wt% epoxy was mixed and pressed to prepare toroidal-shaped composites. The reflection loss (RL) spectra were obtained by direct S11 measurement and calculation from the permittivities (ϵ' , ϵ'') and permeabilities (μ' , μ'') spectra. The maximum absorption performances, that is, the minimum RL value, satisfies $\text{RL} < -30$ dB for all the 3 samples and the frequencies at minimum RL points ($f_{\text{RL,min}}$) of the $x = 1.1, 1.2$, and 1.3 composites were 13.5, 9.7, and 6.5 GHz, respectively. Three samples were stacked in various stacking orders of ABC, ACB, BAC, BCA, CAB, and CBA to obtain RL spectra according to the stacking sequence. The RL spectra according to the stacked order were not significantly different from each other. The measured RL spectra of these stacked samples were well fitted with the RL spectra calculated using the volume averaged ϵ' , ϵ'' , μ' , μ'' values of the A, B, and C samples. Next, RL spectra were measured with changing the stacking order of $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ (LSMO) powder-epoxy (10 wt%) sample and $\text{SrFe}_{12-2x}\text{Co}_x\text{Ti}_x\text{O}_{19}$ ($x = 1.25$). Because LSMO is conductive, the LSMO-epoxy composite has much higher ϵ' , ϵ'' in the entire measurement frequency band than the insulating hexaferrite composites. The RL spectrum showed a large difference according to the stacking order of the two layers. When hexaferrite is positioned on the side where EM wave was irradiated, much better EM absorption characteristics could be obtained in a wide band, because LSMO layer highly reflects EM wave in a wide frequency range due to its large ϵ' , ϵ'' .

Keywords : M-type hexaferrite, LSMO, stacking order, EM wave absorption, reflection loss

다층 자성복합체의 적층 순서에 따른 전자기파 흡수 특성

강영민 · 김재욱 · 허재희

한국교통대학교 응용화학에너지공학부, 충북 충주시 대학로 50, 27469

이상민*

한국교통대학교 창의융합학부, 충북 충주시 대학로 50, 27469

(2022년 11월 14일 받음, 2022년 12월 21일 최종수정본 받음, 2022년 12월 21일 게재확정)

다층 자성 세라믹 흡수체-epoxy 복합재료의 적층 순서에 따른 전자기파 흡수 특성을 연구하였다. 먼저 전자기파의 최대 흡수 주파수가 서로 다른 세 조성의 M형 hexaferrite $\text{SrFe}_{12-2x}\text{Co}_x\text{Ti}_x\text{O}_{19}$ ($x = 1.1, 1.2, 1.3$) 분말-epoxy(10 wt%) 복합체를 toroid형으로 제작하여 주파수 대역에 따른 RL spectra를 얻어 전자기파 흡수 특성을 평가하였다. $x = 1.1, 1.2$ 및 1.3 세 시료(각 C, B, A로 명함)의 복합체를 각각 평가하였을 때 최적 두께에서 최대 흡수능, 곧 최소 RL 값 ($\text{RL}_{\text{min}} < -30$ dB)을 모두 만족하였고 이 때 $x = 1.1, 1.2$ 및 1.3 복합체의 최대 흡수 주파수($f_{\text{RL,min}}$)는 13.5 GHz, 9.7 GHz 및 6.5 GHz였다. 세 toroid 시료를 ABC, ACB, BAC,

BCA, CAB, CBA의 다양한 적층 순서로 적층하여 적층 순서에 대한 RL spectra를 얻었다. 적층 순서 따른 RL spectra는 조금씩 변화하였으나 서로 크게 다르지는 않았다. 3층 적층 시료의 측정된 RL spectra는 A, B, C 세 시료의 ϵ' , ϵ'' , μ' , μ'' spectra의 체적 평균 ϵ'_{ave} , ϵ''_{ave} , μ'_{ave} , μ''_{ave} 값을 이용하여 계산된 RL spectra와 잘 맞는 결과를 얻었다. 다음으로 La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃(LSMO) 분말-epoxy(10 wt%) 시료와 hexaferrite SrFe_{12-2x}Co_xTi_xO₁₉(x = 1.25)의 2개 시료의 적층 순서 따라 RL spectra를 측정하였다. LSMO 분말은 전도성을 띠기 때문에 LSMO 복합체는 절연성 hexaferrite 시료 보다 전 측정 주파수 대역에서 훨씬 더 높은 ϵ' , ϵ'' spectra를 갖는다. RL 스펙트럼은 두 층의 적층 순서에 따라 상당히 다른 결과를 보였다. 전자기파가 조사되는 쪽에 hexaferrite가 위치할 때 넓은 대역에서 훨씬 더 우수한 전자기파 흡수 특성을 얻을 수 있었다. 이는 전도성이 높은 LSMO 층이 hexaferrite 층 보다 넓은 주파수 범위에서 전자기파를 더 강하게 반사하기 때문이다.

주제어 : M-type hexaferrite, LSMO, 적층순서, 전자기파 흡수, 반사손실

I. 서 론

최근 전자 부품, 통신기기, 군사, 항공, 자동차 등 다양한 산업 분야에서 전자기파의 흡수 및 차폐에 관한 문제가 논의되고 있다. 차폐 및 흡수를 통한 전자기파의 인체 유해성 방지 및 신호처리에 대한 전자기파 간섭(Electromagnetic interference, EMI) 억제에 대한 요구가 증가하였고, 이에 따라 전자파 차폐 및 흡수 재료에 대한 광범위한 연구가 수행되고 있다[1-4]. 전자기파의 차폐 및 흡수의 문제는 소재의 복소 유전율($\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon''$)과 복소 투자율($\mu_r = \mu' - j\mu''$) 값에 따라 결정된다. 특히 전자기파의 흡수가 잘 일어나기 위해서는 해당 전자기파의 주파수에서 흡수체의 ϵ' , ϵ'' , μ' , μ'' 값의 상대적인 크기와 흡수체의 두께(d) 관계에 의해 결정되는 임피던스 정합(impedance matching) 조건을 만족하여 입사면에서 전자기파의 반사가 최소화되어야 한다. 또한 흡수체 내에서 전기장에 의해 진동하는 전하(charge)나 전기쌍극자(electric dipole)에 의한 유전적 손실 기구(dielectric loss mechanism) 또는 자벽이나 전자 스핀의 운동과 관련된 자기적 손실 기구(magnetic loss mechanism)들이 존재해야 한다. 이들 손실 기구는 유전율의 허수부(ϵ'') 및 투자율의 허수부(μ'')의 값에 반영되기 때문에 $\epsilon'' > 0$, $\mu'' > 0$ 일 때 흡수체 내부로 입사된 전자기파의 에너지를 흡수하여 열적에너지로 변환하여 방출할 수 있게 된다[5,6].

전자기파 흡수체로 주목받는 소재 중 M형 hexaferrite는 주로 자기적인 흡수 기구에 의해 전자기파를 흡수하며 GHz 이상의 주파수 대역에서는 강자성 공명(ferromagnetic resonance, FMR)에 의한 전자기파 흡수가 가능하다. 따라서 FMR 주파수를 조절하여 전자기파를 흡수하는 주파수 대역을 제어할 수 있게 된다. 본 연구의 전반부에서는 FMR 주파수 대역이 다른 3개의 hexaferrite 조성의 적층 순서에 따라 전자기파의 흡수 특성이 어떻게 변화하는지 연구하였다. 다음으로는 절연성 소재인 M형 hexaferrite-epoxy 복합체와 La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃(LSMO)-epoxy 복합소재 2층 구조에서 적층 순서에 따른 전자기파의 흡수 및 차폐 특성을 연구하였다. LSMO는 perovskite 구조를 갖는 망간계 산화물 중 가장 높

은 큐리 온도(T_C)가지며, Mn 이온들이 산소 이온을 매개로 전자를 서로 교환하는 이중교환기구(double exchange mechanism)에 의해 자발적인 스핀 배향을 하여 페리자성(Ferri-magnetism) 특성을 보이는 소재이다[7,8]. LSMO는 Mn³⁺ 및 Mn⁴⁺ 간의 electron hopping에 의해 전기전도성을 갖기 때문에 자기적 손실 및 유전적(도전적) 손실에 의한 전자기파의 차폐 및 흡수 특성도 구현 가능하며, 최근 이에 대한 몇몇 연구 결과들이 보고되고 있다[9-11].

II. 실험 방법

M형 hexaferrite SrFe_{12-2x}Co_xTi_xO₁₉(SFCTO, x = 1.1, 1.2, 1.25, 1.3)의 분말을 고상법으로 제조하였다. 대기중에서 1100 °C에서 1차 하소 온도를 진행하였고, 1250~1300 °C에서 2차 하소한 후 분쇄하여 얻었다. 자세한 실험조건은 선행 연구와 같다[12]. 또한 La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃를 조성식으로 하고 Perovskite 결정 구조를 갖는 LSMO 분말을 sol-gel 법 및 1200 °C 하소를 통하여 합성하였다. 전구체로 La(NO₃)₃·6H₂O (99.995%, Acros Oganics), Sr(NO₃)₂(99+%, Acros Oganics), Mn(NO₃)₂·4H₂O(98%, Alfa Aesar) 분말을 사용하여 양이온 조성 비율에 따라 칭량한 후, 분말과 citric산(C₆H₈O₇, Acros Oganics)을 1 대 1의 무게비로 혼합하였다. 혼합된 분말에 증류수를 부어 고상 분말을 모두 용해시킨 후, 암모니아수(NH₄OH, Alfa Aesar)를 용액에 첨가하여 pH = 7이 되도록 맞추었다. 혼합 용액이 담긴 비이커 속에 마그네틱 바를 넣고 100 °C에서 가열 및 교반 시키면서 용액을 모두 증발시키고 연소가 될 때까지 유지하였다. 연소된 분말을 건조로에 넣고 180 °C, 20시간 동안 완전히 건조시켰다. 건조된 알루미늄 도가니에 1200 °C 공기 중 4시간씩 하소하고 분쇄하여 최종 LSMO 분말을 얻었다. 세 조성의 M-type hexaferrite 및 LSMO 분말들을 각각 고형 epoxy(YD-014, 국도화학)를 9 : 1 무게비로 혼합 및 분쇄하여 토로이드(toroid) 형태의 몰드(외경 7.00 mm, 내경 3.03 mm)에 넣고 0.2 ton의 압력을 가해 성형한 후 180 °C에서 20분 동안 경화시켰다. 경화 후 얻어진 성형체를 외경 7.00 mm, 내경 3.03 mm가 되도록 후

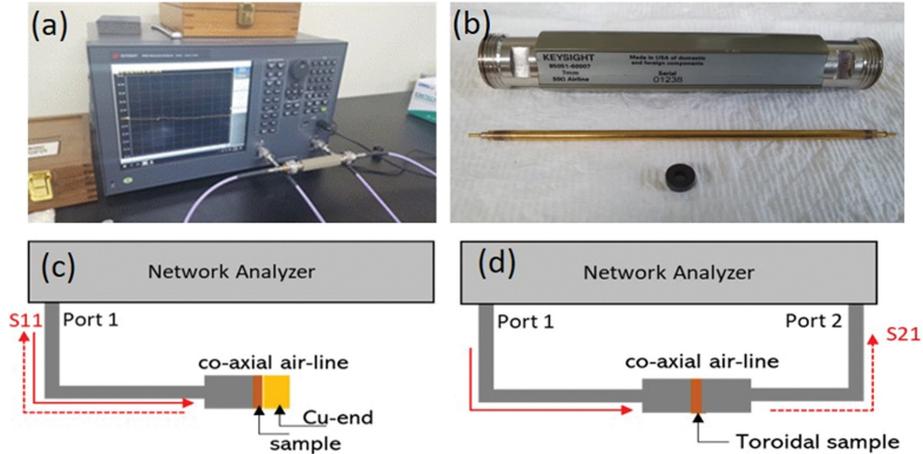


Fig. 1. (a) Photos of network analyzer, (b) air-line kit, and prepared toroidal samples; (c) Schematic illustration of network analyzer for (c) S11 (=RL) and (b) S21 (=SE) measurements using a co-axial air-line fixture.

가공하였다.

결정상 분석은 2차 하소 후 확보된 분말들에 대해 Cu K α radiation($\lambda = 0.154056$ nm)을 사용하는 X-선 회절기(XRD, D8 Advance, Bruker)를 사용하여 진행하였다. 미세 구조는 전계 방출 주사전자현미경(FE-SEM, JSM-7610F, JEOL)을 이용하여 소결 시료의 파단면을 촬영하였다. 네트워크 분석기(Vector Network Analyzer, E50356A, Keysight)의 2개 port에 에어라인 키트(85052BR03)와 함께 사용하여 0.1~18 GHz 주파수 구간에서 S-parameters 및 복소 투자율($\mu = \mu' - j\mu''$)과 복소 유전율($\epsilon = \epsilon' - \epsilon''$)을 측정하였다. 복소 투자율과 복소 유전율 spectra는 S-parameter 측정과 별도로 calibration을 진행하고 Keysight사에서 제공하는 software(N1500A)를 사용하여 얻었다. Fig. 1(a)는 에어라인 키트가 두 port에 체결된 상태를 보여주고 Fig. 1(b)는 에어라인 키트와 측정용 샘플 사진이다. 전자기파의 흡수 특성은(Reflection loss, RL)은 Fig. 1(c) set-up에서 S11 parameter 측정을 통해, 차폐능(Shielding effectiveness, SE)의 측정은 Fig. 1(d)과 같은 set-up에서 S21 측정을 통해 이루어졌다.

III. 결과 및 토의

Fig. 2는 전자기파 흡수용 복합 소재에 사용된 자성 분말 SrFe_{12-2x}Co_xTi_xO₁₉($x = 1.1, 1.2, 1.3$) 및 La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃ 분말의 XRD 회절 패턴들을 보여준다. Fig. 2(a)에는 SrFe₁₂O₁₉ 상의 International Center for Diffraction Data(ICDD) pdf의 정보를 활용하여 시료의 회절 패턴 아래 peak matching 하여 나타내었다. 세 개의 시료 모두 2차상 없이 M형 hexaferrite 상이 잘 형성되었음을 보여준다. Fig. 2(b)의 LSMO 회절 패턴 역시 이차상 없이 Rhombohedral 격자 변

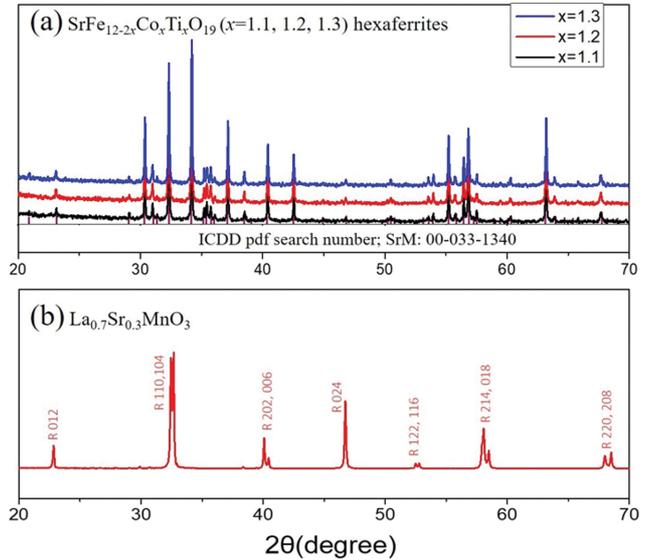


Fig. 2. XRD patterns of (a) SrFe_{12-2x}Co_xTi_xO₁₉ ($x = 1.1, 1.2, 1.3$) and (b) La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃ powders.

형이 있는 Perovskite 구조를 보여준다. Fig. 3은 Fig. 2의 SFCTO($x = 1.1, 1.2, 1.3$) 및 (b) La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃ 분말들의 SEM 사진을 보여준다. epoxy와 복합화 하기 전 단계로 하소 후 분쇄된 분말 형태이기도 하다. SFCTO는 고상법 1300 °C 하소 후 성장한 결정립들을 5 μ m 이하의 분말로 분쇄되었으며 x 값에 따른 뚜렷한 차이는 없다. LSMO 분말은 sol-gel 합성 후 1200 °C 하소 후 분말로 고상법에 의해 제조된 SFCTO 분말에 비하면 보다 미세한 결정립 크기를 갖는다.

Fig. 4(a)~4(d)는 SFCTO($x = 1.1, 1.2, 1.3$) 및 LSMO 분말과 epoxy(10 wt%) 복합체의 복소 유전율 및 복소 투자율 spectra(0.1 GHz $\leq f \leq 18$ GHz)를 보여준다. Fig. 4(a) 및 4(b)의 유전율의 실수부 및 허수부 ϵ' , ϵ'' spectra를 보면 전 주

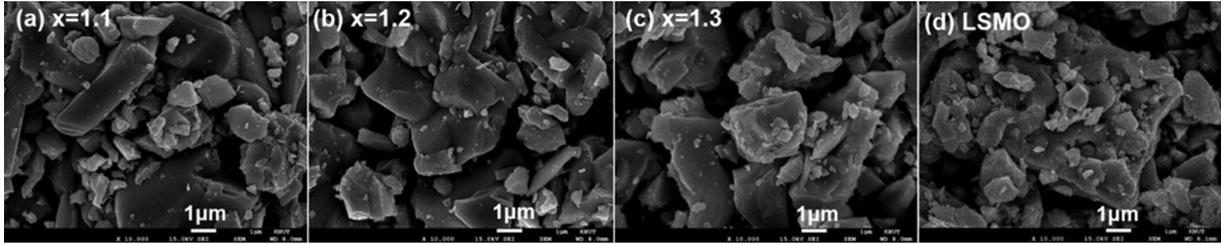


Fig. 3. (a)~(d) SEM images of SrFe_{12-2x}Co_xTi_xO₁₉ ($x = 1.1, 1.2, 1.3$) and (b) La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃ powders.

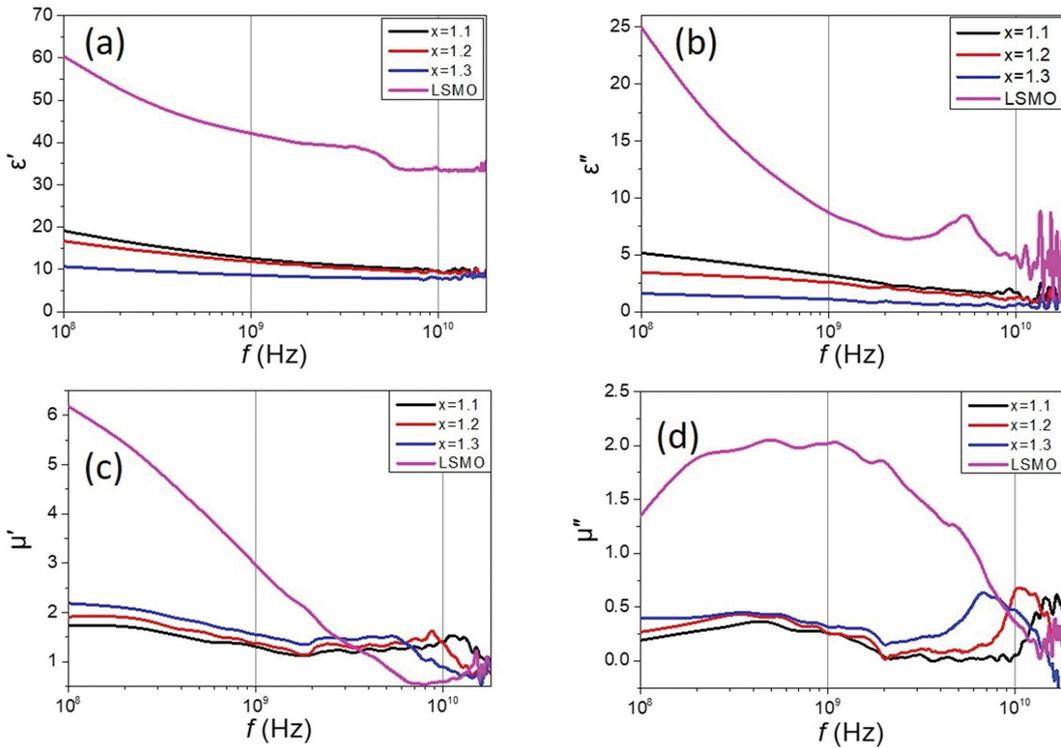


Fig. 4. (a, b) Complex permittivity (ϵ' , ϵ'') and (c, d) complex permeability (μ' , μ'') spectra ($0.1 \leq f \leq 18$ GHz) of SrFe_{12-2x}Co_xTi_xO₁₉ ($x = 1.1, 1.2, 1.3$) hexaferrites and La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃ powder-epoxy composites, respectively.

파수 영역에서 LSMO가 SFCTO에 비해 월등히 높은 값을 보인다. 이는 LSMO의 높은 전도성에 의한 것으로 절연성 epoxy에 전도성 입자가 분산된 구조에서 보이는 space charge 유전 분극에 의한 높은 유전율이 얻어진 것으로 해석할 수 있다. Fig. 4(c) 및 4(d)의 투자율의 실수부 및 허수부 μ' , μ'' spectra도 LSMO와 SFCTO는 큰 차이를 보인다. LSMO는 저주파 영역에서 μ' 값이 높은 값을 보이나 주파수에 따라 급격히 낮아지며 수 GHz 영역에서는 SFCTO가 더 높은 값을 보인다. μ'' spectra도 LSMO는 1 GHz 부근에서 peak을 보이며 SFCTO 보다 높은 값을 보이나 10 GHz 이상에서는 0에 가까운 값으로 낮아진다. 반면 SFCTO의 μ' spectra는 수 GHz 대역까지 일정한 값을 유지하다가 10 GHz 전후 주파수에서 transition이 일어나고 이때 μ'' spectra

는 peak을 보인다. 이는 LSMO에 비해 SFCTO의 높은 결정자기이방성 때문이다. x 값이 증가할 때 μ'' spectra peak 위치의 주파수($f_{\mu''\max}$) 값이 감소한다. 이는 SFCTO에서 Co-Ti가 치환되는 함량(x)이 증가될 때 결정자기이방성이 감소하고, FMR 주파수도 이에 비례하여 감소하기 때문이다[12-14]. SFCTO에 대해서는 μ'' 의 peak 주파수 ($f_{\mu''\max}$)가 FMR 주파수에 해당한다.

Fig. 4(a)~4(d)의 복소 유전율(ϵ' , ϵ'')과 복소 투자율(μ' , μ'') spectra 값으로부터 전자기파 흡수 성능을 말해주는 반사손실 (Reflection loss, RL)을 계산하였고 이를 주파수(f)와 10 mm 이하의 두께(d) 범위에서 2차원 RL map으로 Fig. 5(a)~5(d)에 제시하였다. 여기서 RL 값은 전송선 이론(transmission line theory)을 바탕으로 하는 아래 두 식(1), (2)를 이용하여

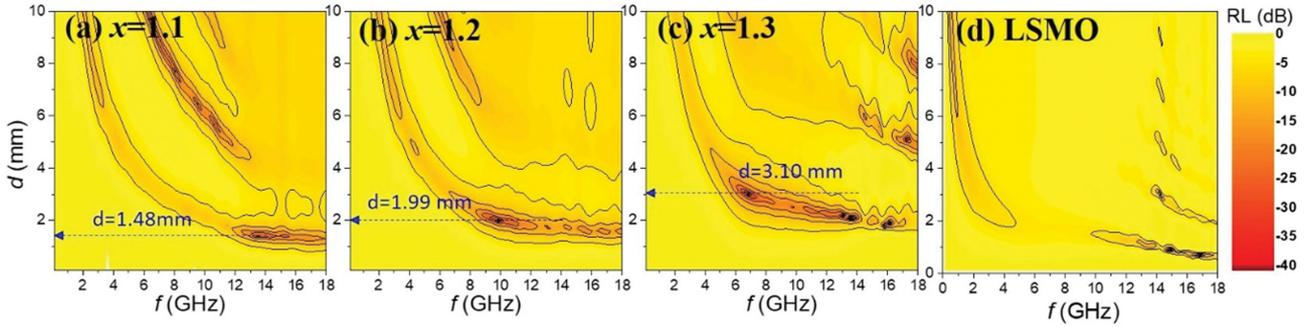


Fig. 5. (a~d) Calculated RL maps of SrFe_{12-2x}Co_xTi_xO₁₉ (x = 1.1, 1.2, 1.3) hexaferrites and La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃ powder-epoxy composites.

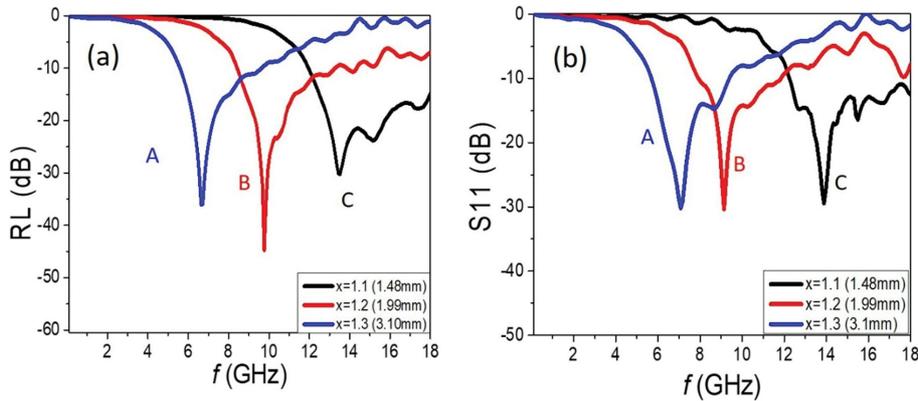


Fig. 6. (a) Calculated RL and (b) measured S11 spectra of hexaferrites SrFe_{12-2x}Co_xTi_xO₁₉ with x = 1.1 (C), 1.2 (B), 1.3 (A) powder-epoxy composites at the optimal thickness.

계산하였다[15].

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

$$RL \text{ (dB)} = -20 \log \left| \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \right| \quad (2)$$

Z_{in} 은 재료의 임피던스, Z_0 는 자유 공간의 임피던스 $\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon''$ 과 $\mu_r = \mu' - j\mu''$ 은 복소 유전율과 복소 투자율, f 는 입사 전자기파의 주파수, c 는 빛의 속도, d 는 흡수체의 두께이다.

Figs. 5(a~c)를 통해 $x=1.1, 1.2, 1.3$ 조성에 따라 강한 전자기파의 흡수가 일어나는 영역이 순차적으로 변화함을 알 수 있다. 전자기파의 최대 흡수가 일어나는 최소 RL 값을 보이는 주파수는 13.5, 9.8, 6.7 GHz로 x 값이 증가함에 따라 단계적으로 낮아지며 그 때의 두께는 1.48, 1.99, 3.10 mm로 얻어졌다. 이 지점에서의 RL spectra는 Fig. 6(a)에 제시하였다. 이는 위 식(1)과 식(2)에 의해 복소유전율과 복소투자율 값으로부터 계산에 의해 도출된 것이다. 실제 해당 두께로 toroidal 각 샘플을 가공하여 Fig. 1(c)의 set-up과 같이 Cu end socket에 붙이고 S-parameter 측정법으로 S11을 측정하

여 RL spectra를 얻어 Fig. 6(b)에 제시하였다. 여기서 완전 반사를 가정할 수 있는 Cu를 샘플 끝에 붙이고 네트워크 분석기의 1 port만으로 S11을 얻을 때 이는 RL 값의 실 측정이라 할 수 있다. Fig. 6(a)의 계산된 결과와 비교했을 때 실측된 결과도 매우 유사하게 얻어 짐을 알 수 있다. RL spectra peak의 최소 RL 값과 그때의 주파수 값에 약간의 차이가 있는 것은 가공하여 제조한 샘플 두께의 오차(± 0.02 mm) 및 측정오차에서 발생했을 것으로 보고 있다.

다음으로 최대 흡수 주파수가 다른 $x=1.3, 1.2, 1.1$ 시료를 각각 A, B, C로 명명하고 적층 순서에 따른 흡수 특성의 변화를 측정하였다. Fig. 1(c)와 같은 set-up으로 co-axial airline에 3개 시료를 밀착시켜 키우고 S11을 측정하여 RL spectra를 도출하였다. 이때 모든 경우의 수로 적층 순서를 ABC, ACB, BAC, BCA, CAB, CBA의 6가지로 변화시켜 가며 각각 측정을 진행하였다. Fig. 7(a)는 적층 순서에 따른 RL spectra를 보여주며 적층 순서에 따라 크게 다르지는 않을 것을 알 수 있다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 흡수 주파수 대역이 다른 A, B, C 개별 시료의 $RL < -30$ dB의 우수한 흡수 peak이 더해지거나 평균적으로 얻어져 매우 broad한 흡수 spectra를 예상할 수도 있으나 대체로 $RL < -10$ dB 이

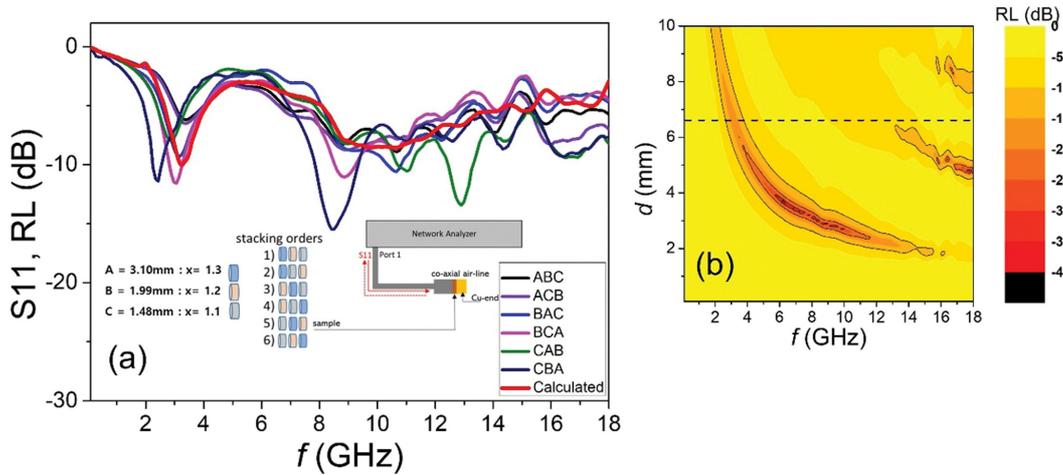


Fig. 7. (a) Measured S11 spectra of 3 layered composites (A, B, C) with varying stacked sequences, and RL spectra obtained by calculation with volume-averaged properties (ϵ' , ϵ'' , μ' , μ'') of A, B, and C samples and total thickness $d = d_A + d_B + d_C$; (b) RL map of obtained by calculation with volume-averaged properties (ϵ' , ϵ'' , μ' , μ'') of A, B, and C samples.

하의 흡수 spectra를 보이며 Fig. 6에서 보였던 A, B, C 시료 고유의 흡수 peak는 나타나지 않는다. 이러한 결과를 해석하기 위해 A, B, C 시료의 복소 유전율(ϵ' , ϵ'')과 복소 투자율(μ' , μ'')의 체적 평균값을 아래와 같이 도출하였다.

$$\begin{aligned} \epsilon'_{ave} &= \epsilon'_A \frac{d_A}{d_A + d_B + d_C} + \epsilon'_B \frac{d_B}{d_A + d_B + d_C} + \epsilon'_C \frac{d_C}{d_A + d_B + d_C} \\ \epsilon''_{ave} &= \epsilon''_A \frac{d_A}{d_A + d_B + d_C} + \epsilon''_B \frac{d_B}{d_A + d_B + d_C} + \epsilon''_C \frac{d_C}{d_A + d_B + d_C} \\ \mu'_{ave} &= \mu'_A \frac{d_A}{d_A + d_B + d_C} + \mu'_B \frac{d_B}{d_A + d_B + d_C} + \mu'_C \frac{d_C}{d_A + d_B + d_C} \\ \mu''_{ave} &= \mu''_A \frac{d_A}{d_A + d_B + d_C} + \mu''_B \frac{d_B}{d_A + d_B + d_C} + \mu''_C \frac{d_C}{d_A + d_B + d_C} \end{aligned}$$

여기서 ϵ'_{ave} , ϵ''_{ave} , μ'_{ave} , μ''_{ave} 는 위 식들에 의해 구한 각 물성의 체적 평균 값이며 주파수에 따른 spectra를 갖는 함수이다. 이렇게 하여 얻어진 값들로 식(1), (2)를 이용하여 두께에 따른 RL 값을 얻고 2-D RL map으로 나타낸 그래프가 Fig. 7(b)이다. A, B, C 세 샘플의 두께 합 $d_{A+B+C} = 6.57$ mm에 해당하는 점선을 RL map에 표시하였고, RL spectra는 Fig. 7(a) 붉은색 실선으로 다양한 적층 순서로 측정된 spectra와 같이 나타내었다. 실제 측정된 측정된 S11 spectra와 대략적으로 잘 맞음을 알 수 있다. 1 GHz~18 GHz 영역의 전자기파의 파장은 30 cm~1.67 cm 범위인데, 이러한 파장에 비해 훨씬 작은 두께 범위에서 유전적 특성이 유사한 3개 시료의 적층 순서는 전자기파의 흡수 특성의 변화에 큰 영향이 없는 것으로 해석할 수 있다. 그러나 이러한 분석은 본 연구의 SFCTO series와 같이 유전적, 자기적 특성이 유사한 층이 적층된 경우에 한하여 적용될 수 있다고 사료된다.

한편 Fig. 4(a), 4(b)에서 보는 바와 같이 LSMO와 같은 전도성 입자의 복합체는 유전율이 전 주파수 대역에서 절연성 SFCTO보다 월등히 높고 임피던스 부정합에 의한 전자기파의 표면 반사를 예상할 수 있다. 따라서 반사 특성이 우수한 LSMO와 그렇지 않은 SFCTO가 함께 적층될 경우 입사되는 전자기파에 대하여 적층 순서가 RL spectra의 변화에 주는 영향이 클 것이다. 이를 검증하기 위해 먼저 LSMO-epoxy(10 wt%) 복합체와 10 GHz 부근에서 높은 전자기파 흡수 특성을 갖는 SFCTO-epoxy(10 wt%) 두 개 toroidal 시료를 밀접시켜 2-port 연결을 통해 4개의 S-parameter, S11, S21, S12, S22를 측정하였다. Fig. 8(a)와 8(b)는 LSMO 복합체(1.5 mm)/SFCTO 복합체(1.9 mm) 및 LSMO 복합체(1.5 mm)/SFCTO 복합체(1.5 mm)에 대한 S-parameter spectra를 각각 보여준다. 여기서 SFCTO는 port 1쪽, LSMO는 port 2쪽을 바라보고 있다. Fig. 8(a) 및 8(b)에서 공통적으로 차폐능을 의미하는 S12 및 S21 spectra는 거의 일치하는 결과를 보여준다. 이는 전자기파의 차폐능 경우 LSMO나 SFCTO 적층 순서에 상관없다는 것을 의미한다. 그러나 S11, S22 spectra는 두 경우 모두 서로 간에 큰 차이를 보여준다. S22 spectra가 1 GHz 이하의 낮은 주파수 대역을 제외하고 측정 주파수 대역의 대부분의 영역에서 0 dB에 가까운 것은 port 2에서 LSMO 쪽으로 입사된 전기 신호가 대부분 반사되어 port 2로 되돌아가는 양이 큰 것을 의미한다. 이는 LSMO의 높은 유전율로 인한 반사 특성 때문이다. 낮은 주파수 영역 ($f < 1$ GHz)에서 차폐능(S12 or S21) 이 0에 가깝고 S11, S22가 공통적으로 낮은 부분은 반사나 흡수 없이 전자기파가 투과하는 것을 의미한다. 반면 중간 영역에서 S22가 0에 가깝지만 S11은 큰 음의 값으로 떨어지는 peak들을 보이는데

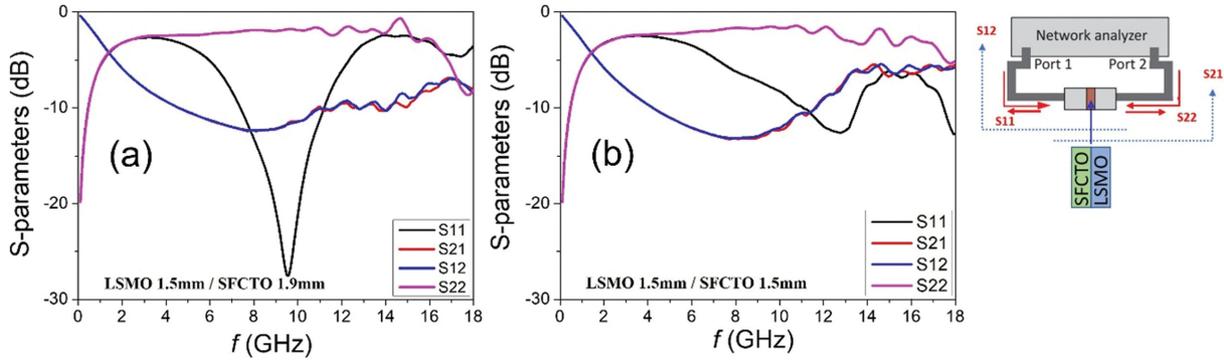


Fig. 8. S-parameters of 2 layered LSMO (1.5 mm)/SFCTO ($\text{SrFe}_{0.5}\text{Co}_{1.25}\text{Ti}_{1.25}\text{O}_{19}$) samples with varying SFCTO thickness of (a) 1.9 mm and (b) 1.5 mm.

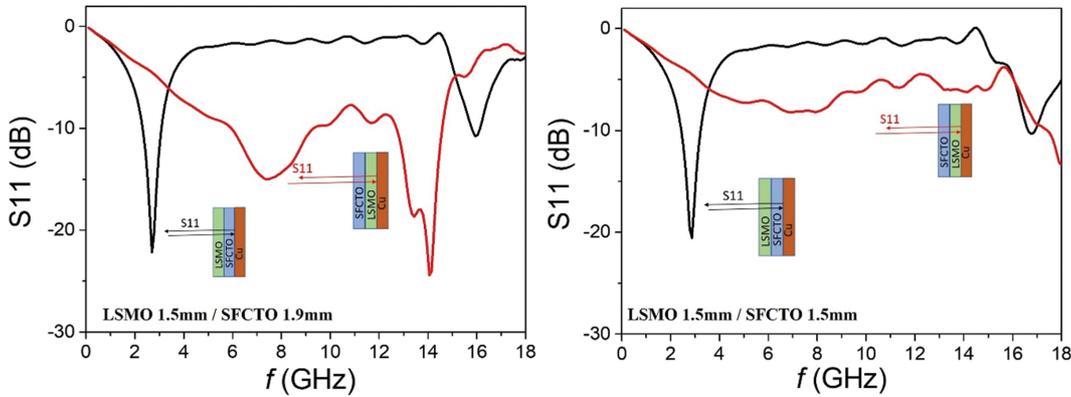


Fig. 9. Measured S11 spectra of 2 layered LSMO (1.5 mm)/SFCTO ($\text{SrFe}_{0.5}\text{Co}_{1.25}\text{Ti}_{1.25}\text{O}_{19}$) samples with varying SFCTO thickness of (a) 1.9 mm and (b) 1.5 mm.

Table I. Minimum RLs (RL_{min}), frequencies and thicknesses at the RL_{min} points (f_{RLmin}) obtained by calculation and measurements for the SFCTO samples ($x = 1.3, 1.2, \text{ and } 1.1$)

Sample I.D	x	Calculated			Measured		
		RL_{min} (dB)	f_{RL} (GHz)	d_{RL} (mm)	RL_{min} (dB)	f_{RL} (GHz)	d_{RL} (mm)
A	1.3	-35.8	6.68	3.10	-30.2	7.08	3.10
B	1.2	-44.8	9.77	1.99	-30.4	9.20	1.99
C	1.1	-30.1	13.5	1.48	-29.5	13.8	1.48

이는 port 1에서 SFCTO 쪽으로 입사한 전기 신호가 해당 주파수 대역에서 흡수가 강하게 일어나기 때문이다. 곧, 두 시료의 유전율의 차이가 큰 경우 전자기파의 흡수는 적층 순서에 따라 크게 달라질 수 있음을 의미한다.

Fig. 9(a)~9(b)에서 LSMO와 SFCTO의 적층 순서에 따른 전자기파 흡수특성을 제시하였다. Fig. 1(c)와 set-up과 같이 1-port를 air-line에 연결하고 LSMO/SFCTO, SFCTO/LSMO와 같이 적층 순서를 번갈아 가며 S11 parameter를 측정하였다. LSMO의 두께가 1.5 mm, SFCTO 두께가 1.9 mm인 경우는 Fig. 9(a)에, LSMO 두께가 1.5 mm, SFCTO 두께가 1.5 mm인 경우는 Fig. 9(b)에 나타내었다. Fig. 8의 S-parameter

측정 결과를 통해 예상한 바와 같이 적층 순서에 따라 RL spectra는 크게 다르며 SFCTO 두께 변화에 따라서도 결과는 상당한 차이를 보인다. 이는 RL spectra는 RL map에서 확인한 바와 같이 최적 두께에서 큰 음의 값을 갖고 이보다 두꺼워지거나 얇아지면 RL의 절대값은 감소하기 때문이다. 전반적인 반사 특성이 좋은 LSMO가 1-port 쪽에서 들어오는 전기 신호를 먼저 맞을 때는 4~15 GHz 정도의 넓은 주파수 대역에서 낮은 흡수 특성을 보이나 SFCTO가 먼저 맞을 때는 전반적인 흡수 특성이 좋아진다. 그러나 두께, 주파수에 따라 임피던스 정합 특성이 달라지기 때문에 3 GHz 부근에서는 오히려 LSMO가 표면에 있을 때 큰 음의 peak이 나타

나기도 한다. 유전율 변화의 차이가 큰 시료들을 적층 했을 때 각 층의 두께 변화에 따른 RL 흡수 특성에 대한 해석은 복잡한 계산이 필요하므로 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 전자기 해석 tool[16]을 활용하면 예측이 가능할 것이다. 본 연구 결과를 바탕으로 볼 때 SFCTO/LSMO 2층 적층 구조를 활용하면 $SE < -10$ dB의 우수한 차폐특성과 함께 광대역의 전자기파 흡수 특성도 구현 가능할 것이다.

IV. 결 론

치환 조성의 변화에 따라 흡수 주파수 대역이 다른 SFCTO($x = 1.1, 1.2, 1.3$) 3층 적층 구조에서 적층 순서에 따른 전자기파 흡수 특성의 변화와 및 유전율 차이가 큰 LSMO/SFCTO 2층 구조에서 전자기파 흡수 및 차폐 특성을 연구하였다. 먼저, 고주파 유전 특성이 크게 다르지 않은 3개의 SFCTO 시료 A, B, C를 적층한 흡수체의 경우는 적층 순서에 따라 RL spectra는 큰 차이를 보이지 않았다. 3층으로 적층된 시료의 측정된 RL spectra는 각 시료의 유전율 및 투자율의 체적 평균값과 층 두께에서 계산된 RL spectra로 잘 fitting이 되는 결과를 얻었다. 다음으로 고주파 유전율 차이가 큰 두 시료를 적층한 SFCTO/LSMO 2층 구조의 경우는 전자기파가 입사되는 면을 기준으로 적층 순서에 전자기파 흡수 특성이 크게 의존함을 보였다. SFCTO에 비해 높은 고주파 유전율 값을 갖고 반사 특성이 우수한 LSMO 시료가 입사 표면에 놓인 경우 전반적인 흡수 특성이 낮아지며, 그 반대로 SFCTO 시료가 표면에 놓일 경우에 보다 광대역의 전자기파 흡수가 가능하다.

감사의 글

본 연구는 2022년도 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기본 연구(NRF-2022R1F1A1062933) 및 2022년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의

(2021RIS-001(1345341783)) 결과입니다.

References

- [1] K. Joseph, R. Wilson, and G. George, Materials for potential EMI shielding application: processing, properties and current trends, Elsevier 2019.
- [2] S. Geetha, K. K. Satheesh Kumar, Chepuri R. K. Rao, M. Vijayan, and D. C. Trivedi, *J. Appl. Polymer* **112**, 2073 (2009).
- [3] D. Wanasinghe, and F. Aslani, *Compos. Part B Eng.* **176**, 107207 (2019).
- [4] S. Sankaran, K. Deshmukh, M. B. Ahamed, and S. K. K. Pasha, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* **114**, 49 (2018).
- [5] A. N. Yusoff, M. H. Abdullah, S. H. Ahmad, S. F. Jusoh, A. A. Mansor, and S. A. A. Hamid, *J. Appl. Phys.* **92**, 876 (2002).
- [6] M. Yamaguchi, Y. Miyazawa, K. Kaminishi, H. Kikuchi, S. yabukami, K. I. Arai, and T. Suzuki, *J. Magn. Magn. Mater.* **268**, 170 (2004).
- [7] A. Urushibara, Y. Moritomo, T. Arima, A. Asamitsu, G. Kido, and Y. Tokura, *Phys. Rev. B.* **51**, 14103 (1995).
- [8] M. C. Martin, G. Shirane, Y. Endoh, K. Hirota, Y. Moritomo, and Y. Tokura, *Phys. Rev. B.* **53**, 14285 (1996).
- [9] H. A. Reshi, A. P. Singh, S. P. S. Yadav, S. K. Dhawah, and V. Shelke, *J. Mater. Chem. C* **3**, 820 (2015).
- [10] R. B. Yang, C. Y. Tsay, W. F. Liang, and C. K. Lin, *J. Appl. Phys.* **107**, 09A523 (2010).
- [11] Y. L. Cheng, J. M. Dai, X. B. Zhu, D. J. Wu, Z. R. Yang, and Y. P. Sun, *Nanoscale Res. Lett.* **4**, 1153 (2009).
- [12] J.-K. Kim, P.-Y. Yu, and Y.-M. Kang, *J. Magn. Magn. Mater.* **537**, 168235 (2021).
- [13] E.-S. Lim, H. KD Kim, and Y.-M. Kang, *J. Magn. Magn. Mater.* **517**, 167397 (2021).
- [14] S. Thompson, N. J. Shirtcliffe, E. S. O'Keefe, S. Appleton, and C. C. Perry, *J. Magn. Magn. Mater.* **292**, 100 (2005).
- [15] Y. Naito and K. Suetake, *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **19**, 65 (1971).
- [16] S. Ghosh, S. Bhattacharyya, and K. V. Srivastava, *IET Microw. Antennas Propag.* **10**, 850 (2016).