

Microwave Absorption Properties of Sr₃Co₂Z Hexaferrites-graphite-epoxy Composites

Eun-Soo Lim, Tea-Whan Hong, and Young-Min Kang*

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

(Received 3 February 2020, Received in final form 8 February 2020, Accepted 9 February 2020)

Z-type Sr-hexaferrites (Sr₃Co₂Fe_{24+x}O₄₁, x = -1.0, -0.5, 0.0, 0.5, 1.0) were prepared by solid-state reaction processes. XRD analysis revealed that almost single Z-type hexaferrite phase could be obtained at the Fe-deficient composition of x = -1.0. In SEM analysis, it is found that the grain size gradually decreases with increase of x. For the single phase Sr₃Co₂Fe_{24+x}O₄₁ (x = -1.0) powder samples, the Sr₃Co₂Z powder-epoxy-graphite composites were prepared with varying graphite amount (0.00, 1.25, 2.50, 3.75, 5.00 wt%). The height of real and imaginary part of permittivity spectra gradually increases with increasing the graphite amount, whereas the permeability spectra does not show significant variation with the graphite amount. The peak of imaginary part of permeability at ~3 GHz corresponds to the ferromagnetic resonance of the Z-type hexaferrites. The reflection loss (RL) which reflects the electromagnetic wave absorption performances was calculated as functions of frequency and thickness. The minimum RL values are in range of -53 dB~-38 dB and the frequency of minimum RL decreased from 3.18 GHz to 2.49 GHz with the increase of graphite addition.

Keywords : hexaferrites, B-H curve, complex permittivity, complex permeability, microwave absorption, reflection loss

Sr₃Co₂Z-흑연-에폭시 복합체의 마이크로파 흡수 특성

임은수 · 홍태환 · 강영민*

한국교통대학교 화공고분자신소재공학부, 충북 충주시 대학로 50, 27469

(2020년 2월 3일 받음, 2020년 2월 8일 최종수정본 받음, 2020년 2월 9일 게재확정)

Z형 Sr-육방정 페라이트(Sr₃Co₂Fe_{24+x}O₄₁, x = -1.0, -0.5, 0.0, 0.5, 1.0)를 고상법으로 합성하였다. XRD 분석결과 단상의 Z형 육방정 페라이트가 Fe 함량이 화학양론적 조성보다 부족한 x = -1.0 일 때 가장 잘 얻어졌다. SEM 분석 결과 Fe 함량이 줄어들수록 결정립은 순차적으로 성장하는 것으로 확인되었다. 순수한 Z형 육방정 페라이트를 얻은 최적 조성 Sr₃Co₂Fe_{24+x}O₄₁(x = -1.0) 분말에 대해 0~5 wt%의 흑연 분말을 첨가하여 육방정 페라이트-에폭시-흑연 복합체를 제조하였다. 흑연 분말의 함량이 증가할수록 복소 투자율의 큰 변화 없이 복소 유전율만 단계적으로 증가하였다. 3 GHz 부근에서 강자성 공명에 의한 투자율의 허수부의 peak이 나타났다. 주파수와 두께에 따른 반사손실(RL)을 계산하여 제시하였다. 최대흡수를 나타내는 RL 최소값은 -53 dB에서 -38 dB의 범위를 보이며, 흑연의 첨가량이 증가함에 따라 최소 RL을 보이는 주파수가 3.18 GHz에서 2.49 GHz로 단계적으로 감소하였다.

주제어 : 육방정 페라이트, B-H 곡선, 복소 유전율, 복소 투자율, 마이크로파 흡수, 반사손실

I. 서 론

Z-형 육방정 페라이트는 (Ba,Sr)₃Co₂Fe₂₄O₄₁의 조성식을 갖고 높은 화학적 안정성과 GHz 영역에서도 비교적 높은 투자율을 갖는 특성[1]으로 인해 EMI 흡수체[2,3], 안테나[4-6], 칩 인덕터[7] 등과 같은 RF(radio frequency)와 마이크로파(microwave) 통신 부품으로 응용이 가능하다. 자성특성으로

포화 자화(saturation magnetization)는 상온에서 ~51 emu/g의 값을 가지고, 약 690 K의 큐리 온도를 갖는다[8]. Ba₃Co₂Z의 경우 상온에서 ~51 emu/g의 포화 자화(saturation magnetization) 값을 가지며, c-면 내 이방성 자계(H_θ~0.12 kOe)가 c-축 이방성 자계(H_φ~12 kOe)보다 작아 자화 용이축은 c면과 평행하게 된다[1]. 강자성 공명(FMR, Ferromagnetic resonance)의 주파수는 ~3 GHz 대역으로, 투자율 허수부 증가를 통해 수 GHz용 흡수소재로 응용을 기대할 수 있다. 현재까지 Ba²⁺를 활용한 CoZ가 연구가 주로 보고 되어 왔다[3-6]. Z형 육방정 페라이트는 BaO-Fe₂O₃-MeO 상평형도[9]에서 다른 유

© The Korean Magnetics Society. All rights reserved.

*Corresponding author: Tel: +82-43-841-5382,

Fax: +82-43-841-5380, e-mail: ymkang@ut.ac.kr

형의 육방정 페라이트 들의 중앙에 위치하며 M, U, Y, W의 상들과 공존할 수 있기에 Z-형 육방정 페라이트를 단상으로 만드는 것은 매우 어려운 일이다. 현재까지 Ba₃Co₂Fe₂₄O₄₁ 같은 Ba₃Co₂Z 육방정 페라이트들[2-7,10]과 Ba_{1.5}Sr_{1.5}Co₂Fe₂₄O₄₁ 같은 Ba-Sr Z-형 육방정 페라이트들[11,12]이 연구되어 왔다. Sr₃Co₂Z 육방정 페라이트(Sr₃Co₂Fe₂₄O₄₁)의 준비는 Ba₃Co₂Z에 비해 까다롭기에 몇몇의 연구들 만이 보고되어 왔다[13-15]. 따라서 단상의 Z형 육방정 페라이트 적절한 합성 온도와 전구체 분말들의 비율 조절을 통하여 공정 조건 확립이 필요하다.

그래핀, 탄소 나노튜브 등과 같은 탄소계 전도성 소재는 도전적, 유전적 손실(conductive loss)을 통해 전자기파를 흡수할 수 있는 소재로 고분자 소재에 필러로 첨가되어 전파흡수 소재로 사용되고 있다[16-18]. 절연 고분자 matrix 내에 첨가된 비자성 전도성 입자는 자기 투자율은 변화시키지 않으면서 복소 유전율 값을 증가시킬 수 있어 육방정 페라이트 자성 분말 소재와 함께 사용하여 전파흡수 특성을 극대화하는 용도로 사용할 수 있다. 본 연구에서는 고분자 바인더를 matrix 내 육방정 페라이트 자성 분말을 주 필러로 하고 전도성 흑연 분말을 첨가제로 사용한 복합체의 전자기파 흡수 특성을 연구하고자 하였다. 거의 단상의 Sr₃Co₂Z를 합성한 선행 연구[15]를 바탕으로 Z형 육방정 페라이트의 기본 조성에서 철의 함량을 조절하여 보다 순수한 Sr₃Co₂Z 상을 합성하였고 그 후 흑연 분말을 단계적으로 첨가하여 GHz 대역에서 전파 흡수 특성의 변화를 연구하였다.

II. 실험 방법

Sr₃Co₂Fe_{24+x}O₄₁(x = -1.0, -0.5, 0, 0.5, 1.0)의 화학적 조성을 고상법으로 합성하였다. Fe₂O₃(Kojundo Chemical, 99.9%), SrCO₃(Kojundo Chemical, 99.9%), CoO(Sigma-Aldrich, 99%) 전구체 분말들의 양이온을 조성 비율에 따라 칭량하였다. 칭량된 분말들을 습식 밀링(Ballmilling)으로 섞어준 후 건조하였고, 1160 °C에서 4시간 동안 1차 하소하였다. 하소된 분말들을 유발에 넣고 분쇄한 후 디스크형 몰드(직경 8 mm)에서 각각 이방 성형하였다. 성형체들과 분말들을 각각 대기 중에서 1210 °C로 2시간 동안 2차 하소하였다. 하소는 5 °C/min로 승온 시켰고, 상온의 온도로 냉각시켰다. 최종 단상의 Z-형 육방정 페라이트를 확보한 조성을 바탕으로 육방정 페라이트-흑연-에폭시 복합체를 제작하였다. 2차 하소된 분말 90 wt%와 에폭시 바인더(YD-014, Kukdo Chemical) 10 wt%와 함께 흑연(synthetic graphite 99%, 20~30 μm) 분말을, 하소 분말 대비 1.25, 2.50, 3.75, 5.00 wt%로 첨가한 뒤 유발에 넣고 고르게 혼합하였다. 혼합된 분말들을 각각 도넛형

몰드(내경 3.04 mm, 외경 7.00 mm)로 성형한 후 대기 중에서 180 °C로 30분 동안 경화 시켰다. 최종 샘플들의 에폭시 부피 비율은 50%였다.

결정 상 분석은 Cu K_α radiation(λ = 0.154056 nm)을 사용하는 X-선 회절(XRD, D8 Advance, Bruker) 분석 장치로 분석하였다. 미세 구조를 관찰하기 위해 전계 방출 주사전자현미경(FE-SEM, JSM-7610F, JEOL)을 이용하여 샘플의 과단면을 촬영하였다. SEM 촬영용 샘플의 과단면과 XRD 측정용 분말은 1차 하소된 분말을 디스크(직경 8 mm)형 몰드에서 이방성형한 뒤 2차 하소한 후 분쇄하여 채취하였다. 분말-에폭시 복합체의 복소 투자율(μ = μ' - jμ'')과 복소 유전율(ε = ε' - ε'')은 도넛(Toroidal)형(내경 3.03 mm, 외경 7.00 mm) 몰드에서 성형 후 경화한 복합체 샘플을 Vector Network Analyzer(E50356A, Keysight)를 에어라인 키트(85052BR03)와 함께 사용하여 1~18 GHz 주파수 구간에서 측정하였다.

III. 결과 및 논의

Sr₃Co₂Z(Sr₃Co₂Fe₂₄O₄₁) 상 합성에 대한 연구는 본 연구팀에서 이미 보고한 연구 결과[15]와 같이 대기 중에서 원료분말들의 혼합체를 1160 °C에서 1차 하소 후 1210 °C에서 2차 하소하였을 때 가장 잘 얻어졌다. 1차 하소 후 형성된 M, Y 상이 주로 얻어지고 1210 °C에서 2차 하소 시 M 상과 Y 상의 반응을 통해 거의 단상의 Z 상이(M + Y → Z) 형성된다. 미량의 2차상으로는 U 상과 M 상을 포함하는 것으로 확인되었다.

본 연구에서는 양이온 조성을 화학량론적인 비 Sr₃Co₂Fe₂₄에서 Fe 함량 x를 조절하여 보다 순수한 Z상의 분말을 얻고자 하였다. Fig. 1는 Fe의 원소비를 조절하면서 1210 °C에서 2차 하소한 Sr₃Co₂Fe_{24+x}O₄₁(x = -1.0, -0.5, 0, 0.5, 1.0)의

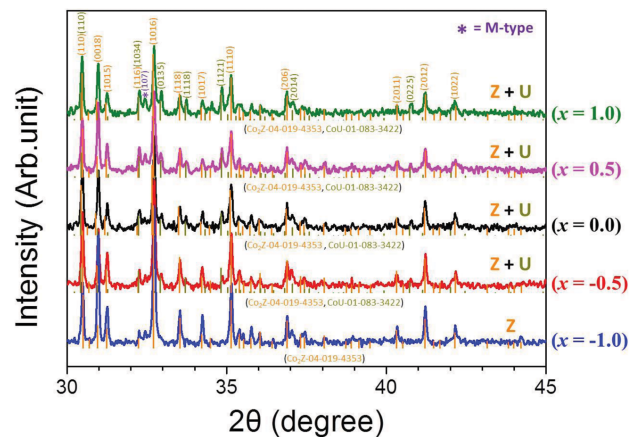


Fig. 1. (Color online) XRD patterns of Sr₃Co₂Fe_{24+x}O₄₁ (x = -1.0, -0.5, 0, 0.5, 1.0) hexaferrites.

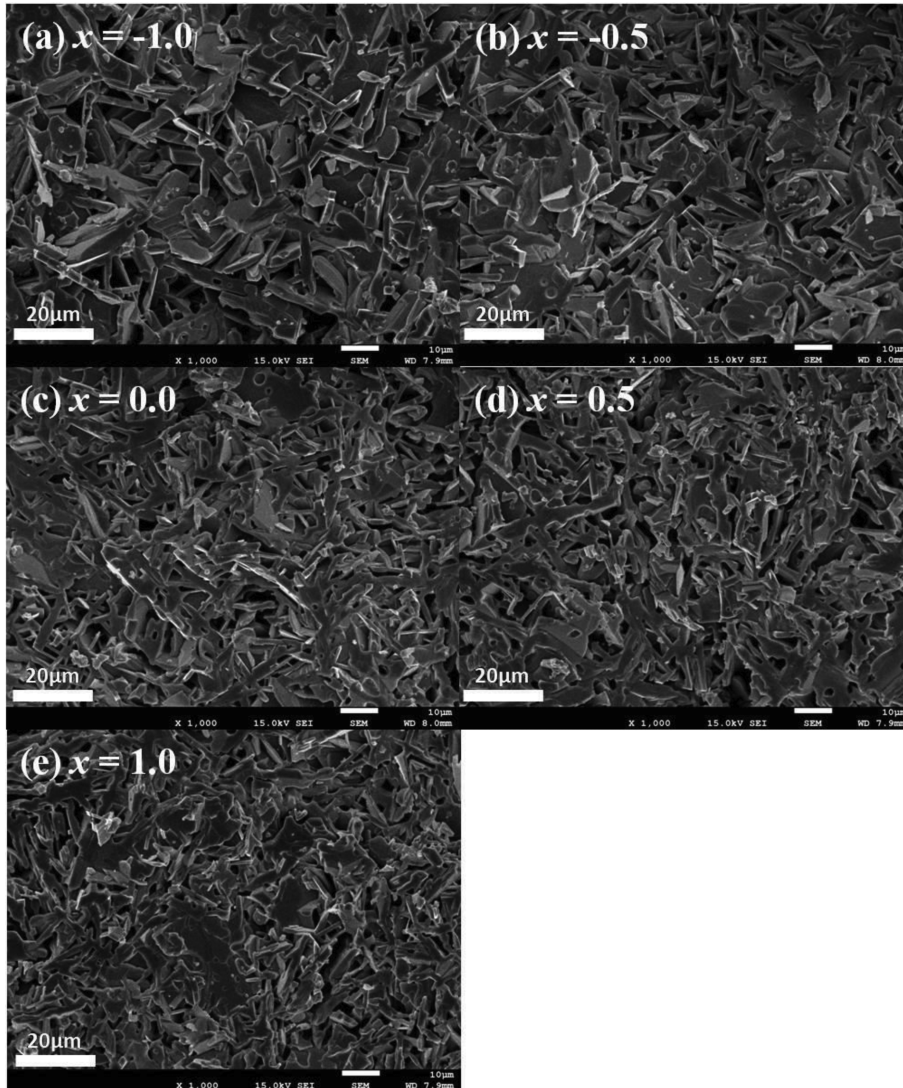


Fig. 2. (a)~(e) SEM images of $Sr_3Co_2Fe_{24-x}O_{41}$ ($x = -1.0, -0.5, 0, 0.5, 1.0$) hexaferrites.

XRD 패턴을 나열하였다. 모든 샘플들은 대기 중에서 1160 °C로 1차 하소 및 재 분쇄 후 1210 °C로 2차 하소하였다. Fe 함량이 증가할수록 Z 상과 함께 U 상의 peak이 증가하고 Fe의 함량을 줄일수록 U 상이 점차적으로 감소하다가 $x = -1.0$ 에서 U 상이 없는 거의 단상의 Z-형 상이 만들어졌다. Fig. 1에 샘플의 X-선 회절 패턴과 함께 International Center for Diffraction Data(ICDD) pdf 정보를 함께 도시하였다.

Fig. 2(a)~(e)는 1210 °C에서 2차 하소한 $Sr_3Co_2Fe_{24+x}O_{41}$ ($x = -1.0, -0.5, 0, 0.5, 1.0$)의 파단면을 1,000배율로 촬영한 SEM 사진을 나열한 것이다. 모두 두께에 비해 면의 길이가 3배 이상 긴 판상형 육방정 페라이트 결정립을 보여주고 있다. Fe의 함량이 많을수록 결정립의 성장을 제어하여 x 값이 클수록 결정립의 평균적 크기가 점차적으로 줄어든다는 것을 확인할 수 있다.

이상의 결과에서 가장 순수한 Z 상을 갖는 조성으로 $x = -1.0$, 곧 양이온 조성 $Sr_3Co_2Fe_{23}$ 을 갖는 육방정 페라이트 분말을 고휘 에폭시 바인더(YD-014)와 9:1의 무게비로 혼합 후 육방정 페라이트 분말 대비 각각 0.00, 1.25, 2.50, 3.75, 5.00 wt% 흑연 분말을 추가로 첨가하여 육방정 페라이트-에폭시-흑연 복합체 샘플을 Toroid 형태로 제작하였다.

Fig. 3(a)~(d)는 이 샘플들의 복소 유전율 및 복소 투자율 spectra($1\text{ GHz} \leq f \leq 18\text{ GHz}$)이다. 흑연이 첨가되지 않은 경우 유전율은 주파수에 따라 큰 변화없이 $\epsilon' = 8, \epsilon'' = 0.2$ 정도의 값을 보이며 투자율 값은 3 GHz 대역의 강자성 공명 현상에 따라 μ' 값은 3 GHz 전후로 감소하며 μ'' 는 3 GHz 부근에서 peak를 보인다. 이전의 Fe 함량을 제어하지 않은 양이온 조성 $Sr_3Co_2Fe_{24}$ 의 복소 투자율 spectra[15]와 비교하면 투자율의 실수부와 허수부의 크기가 소폭 증가한 것으로 확인된다.

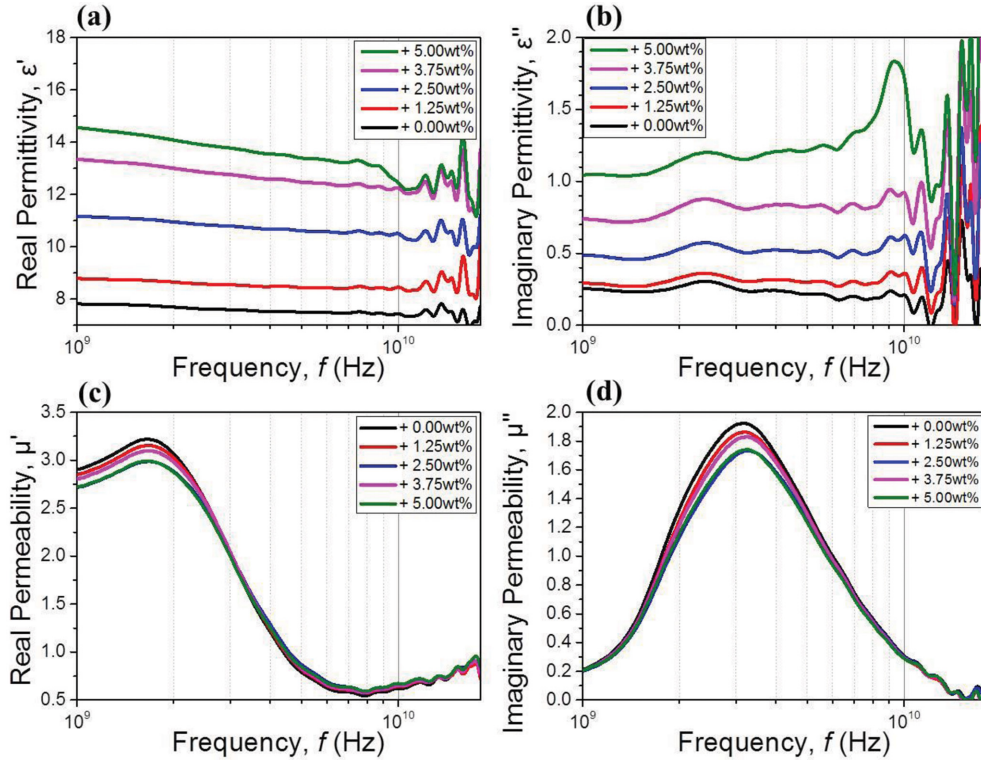


Fig. 3. (Color online) (a, b) complex permittivity (ϵ' , ϵ'') and (c, d) complex permeability (μ' , μ'') spectra of the Sr₃Co₂Z hexaferrite powder-epoxy-graphite (0.00, 1.25, 2.50, 3.75, 5.00 wt%) composite samples.

이는 Z 상의 순도가 보다 더 증가했기 때문으로 판단 할 수 있다. 흑연의 첨가량이 증가됨에 따라 ϵ' , ϵ'' 의 크기는 각각 단계적으로 증가함을 보인다. 반면 투자율 μ' , μ'' 값은 비자성 흑연의 첨가에 따라 소폭 감소하는 경향을 보이나 중요한 변화는 없다. Table I에서는 1 GHz에서의 유전율의 실수부와 허수부 값, 투자율의 실수부값, 투자율의 허수부 최대값과 그때의 주파수를 각각 정리하였다.

Fig. 3에서 측정된 복소 유전율($\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon''$)과 복소 투자율($\mu_r = \mu' - j\mu''$) spectra로부터 전파흡수특성을 나타내는 반사 손실(Reflection loss, RL) spectra를 계산하여 Fig. 4에 나타내었다. RL의 계산은 전송선 이론을 바탕으로 하는 아래 Eq.

Table I. Graphite addition amount (x), real part of permittivity at 1 GHz (ϵ'), imaginary part of permittivity at 1 GHz (ϵ''), real part of permeability at 1 GHz (μ'), maximum imaginary part of permeability (μ''_{max}), and the frequency of maximum imaginary part of permeability ($f_{\mu''_{max}}$) of the hexaferrite powder-graphite-epoxy composites.

x (wt%)	ϵ' (@1GHz)	ϵ'' (@1GHz)	μ' (@1GHz)	μ''_{max}	$f_{\mu''_{max}}$ (GHz)
0.00	7.82	0.255	2.90	1.92	3.17
1.25	8.79	0.292	2.85	1.86	3.19
2.50	11.2	0.489	2.72	1.73	3.28
3.75	13.4	0.738	2.81	1.83	3.24
5.00	14.6	1.05	2.72	1.74	3.25

1, Eq. 2를 활용하였다[19].

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

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

여기서 Z_{in} 은 재료의 입사 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 전자파의 주파수, c 는 빛의 속도, d 는 흡수체의 두께이다. 여기서 유전율과 투자율은 두께에 무관한 함수이며, 주파수에 따라 확보한 복소 유전율과 투자율의 실수부와 허수부 값과(ϵ' , ϵ'' , μ' , μ'') 다양한 두께 d 값을 연속적으로 지정하여 RL spectra를 얻게 된다. Fig. 5에서는 10 mm 이하의 범위의 d 와 f 에 따른 RL 값을 2D map으로 plot하였다. 첫 번째 실선 영역은 $\text{RL} < -10$ dB 이하로 90% 이상의 전파흡수율을, 두 번째 실선은 $\text{RL} < -20$ dB 이하로 99% 이상 전자파를 흡수할 수 있는 영역을 의미한다. 최대 흡수가 일어나는 영역은 전반적으로 3 GHz 내외의 주파수 영역에서 4~5 mm 정도의 두께 일 때이며 10 GHz 이상의 주파수 대역, 보다 낮은 2~3 mm 정도의 두께 영역에서도 흡수가 크게 일어나는 영역이 보인다. 흑연의 함량이 증감에 따라 흡수가

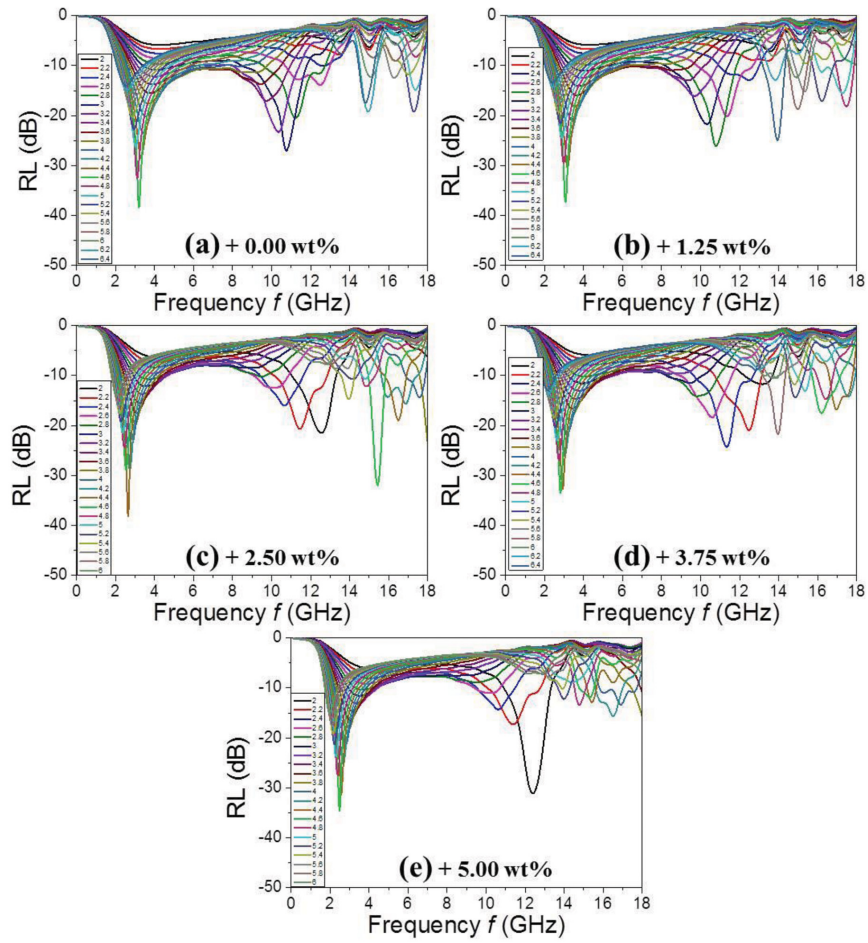


Fig. 4. (Color online) (a)~(e) Reflection loss (RL) spectra of the $\text{Sr}_3\text{Co}_2\text{-Z}$ hexaferrite powder-epoxy-graphite (0.00, 1.25, 2.50, 3.75, 5.00 wt%) at each thicknesses.

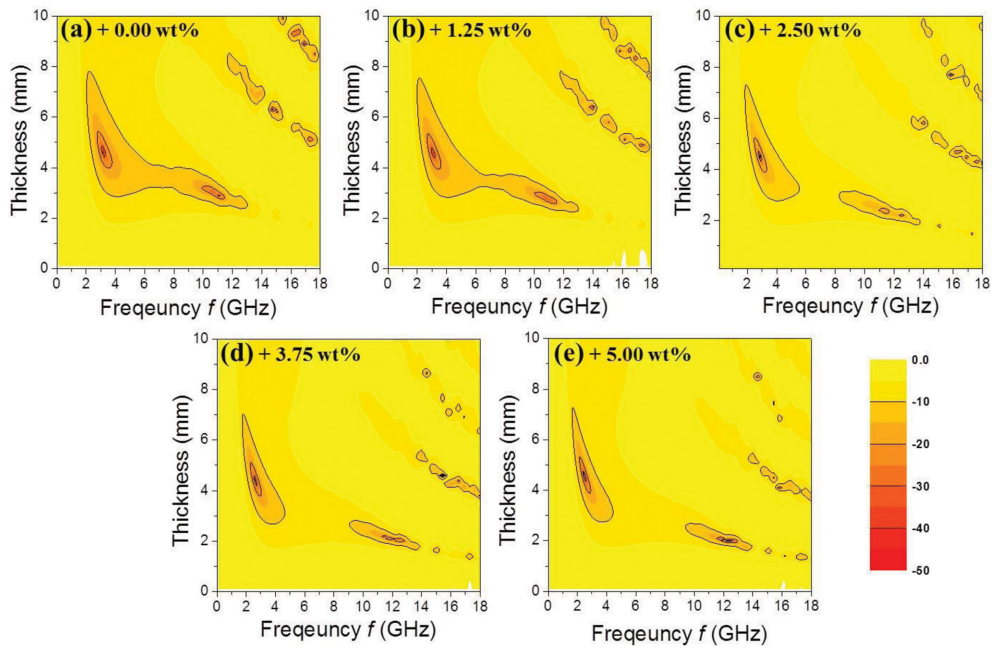


Fig. 5. (Color online) (a)~(e) RL maps of $\text{Sr}_3\text{Co}_2\text{-Z}$ hexaferrite powder-epoxy-graphite (0.00, 1.25, 2.50, 3.75, 5.00 wt%) composites.

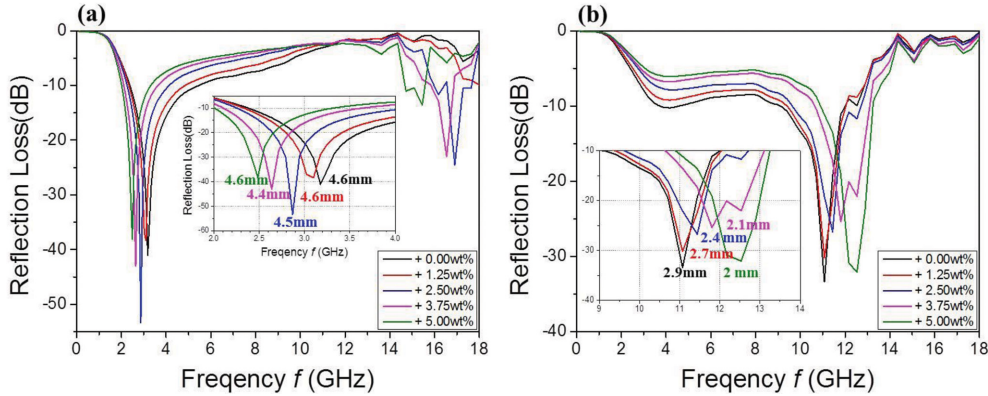


Fig. 6. (Color online) RL of Sr₃Co₂Z hexaferrite powder-epoxy-graphite (0.00, 1.25, 2.50, 3.75, 5.00 wt%) composites as a function of frequency at the first (a) and second (b) optimized thicknesses.

일어나는 두께, 주파수 영역이 서서히 변화하는 것을 알 수 있다.

Fig. 6(a)와 (b)는 Fig. 5에서 RL의 첫 번째, 두 번째 최저점을 지나는 각각 두께에서 주파수에 따른 RL spectra를 나타낸 그림이다. 각각의 샘플들은 2~4 GHz, 11~13 GHz 영역에서 음의 반사손실(RL_{min}) peak 지점을 갖는다. 흑연이 2.5 wt% 함유된 복합체의 경우 3 GHz 부근, d = 4.5 mm에서 RL < -50 dB 이하의 우수한 흡수 특성을 보인다. Fig. 6(a)의 inset 그림에서 흑연의 함량이 증가 할수록 최대 흡수가 일어나는 주파수가 3.18 GHz에서 2.49 GHz를 단계적으로 감소하는 것을 보여주며 Fig. 6(b)는 10 GHz 이상의 두 번째 흡수 peak의 부근을 보여주는데 여기에서는 흑연의 함량이 증가할수록 최대 흡수가 일어나는 주파수가 조금씩 증가하는 경향을 보여주고 있다. 이는 흑연 함량의 증가에 따라 복소유전율이 단계적으로 증가하며 각각의 임피던스 matching 특성의 변화에 의한 것으로 해석될 수 있다. Table II에서는 첫 번째 흡수 peak(RL_{min1})과 두 번째 흡수 peak(RL_{min2})에서의 RL 값과 그때의 주파수와 두께를 각각 정리하였다. 3 GHz 대역에서는 흑연의 함량 증가에 따라 최적 주파수가 낮아지고 최적 두께는 증가하였으나 12 GHz 대역에서는 흑연의 첨가될수록 최대 흡수 주파수는 증가하고 두께는 감소하는 경향을 보였다.

Table II. Graphite addition amount (*x*), first minimum RL (RL_{min1}) and second minimum RL (RL_{min2}) values, and the respective thicknesses (*d_{RL1}*, *d_{RL2}*) and frequencies (*f_{RL1}*, *f_{RL2}*) at the first and second RL minimum points.

<i>x</i> (wt%)	RL _{min1} (dB)	<i>f_{RL1}</i> (GHz)	<i>d_{RL1}</i> (mm)	RL _{min2} (dB)	<i>f_{RL2}</i> (GHz)	<i>d_{RL2}</i> (mm)
0.00	-41.0	3.18	4.6	-33.4	11.1	2.9
1.25	-38.3	3.10	4.6	-30.2	11.1	2.7
2.50	-53.4	2.87	4.5	-26.7	11.4	2.4
3.75	-43.1	2.64	4.4	-25.4	11.8	2.1
5.00	-38.1	2.49	4.6	-32.1	12.5	2.0

IV. 결 론

고상법의 방법으로 Z-형 육방정 페라이트 Sr₃Co₂Fe_{24+x}O₄₁ (*x* = -1.0, -0.5, 0, 0.5, 1.0)를 합성하였다. Fe 함량을 조절하여 Sr₃Co₂Fe_{24+x}O₄₁(*x* = -1.0)를 1210 °C에서 단상의 Z-형 육방정 페라이트를 얻었다. 단상의 Z-형 Sr₃Co₂Fe_{24+x}O₄₁(*x* = -1.0) 분말-에폭시 복합체의 ε'는 ~8, ε''는 0.2~0.3의 값을 보였고, 3 GHz 대역 강자성 공명 peak에 의해 투자율 최대 허수부 μ''는 ~2 정도의 값을 보였다. 육방정 페라이트-에폭시 복합체에 흑연 분말을 0~5 wt%까지 첨가함에 따라 투자율의 큰 변화없이 유전율은 단계적으로 증가하였다. 복소 유전율과 투자율 spectra를 통해 두께와 주파수에 따른 반사손실 값(RL)을 도출하였다. 흑연의 함량의 증가에 따라 유전율이 점차적으로 증가하였고, 그로 인해 RL_{min}의 주파수가 임피던스 매칭 특성에 변화를 줄 수 있으며 마이크로파 흡수 특성의 제어가 가능함을 알 수 있었다. Z-형 육방정 페라이트-에폭시-흑연 복합체는 3 GHz 부근뿐만 아니라 12 GHz 부근에서 각각 마이크로파 흡수체로 활용될 수 있으며, 최대 흡수가 일어나는 최적 두께도 4~5 mm에서 2~3 mm 정도로 얇아질 수 있음을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2019년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2017R1C1 B2002394).

References

[1] J. Verwell, Magnetic properties of materials (ed. J. Smit), New York, McGraw-Hill, 64 (1971).
 [2] S. B. S. Magham, M. Sharma, S. R. Shannigrahi, H. R. Tan, V.

- Sharma, Y. S. Meng, S. Idapalpati, R. V. Ramanujan, and D. V. M. Repaka, *J. Magn. Magn. Mater.* **441**, 303 (2017).
- [3] J. Shen, K. Chen, L. Li, W. Wang, and Y. Jin, *J. Alloy. Comp.* **615**, 488 (2014).
- [4] W. Lee, Y.-K. Hong, J. Park, G. LaRochelle, and J. Lee, *J. Magn. Magn. Mater.* **414**, 194 (2016).
- [5] S.-E. Lee, H.-J. Kim, J.-H. Lee, K.-S. Oh, H. T. Hahn, and J.-W. Choi, *Mater. Lett.* **187**, 94 (2017).
- [6] N. Neveu, Y.-K. Hong, J. Lee, J. Park, G. Abo, W. Lee, and D. Gillespie, *IEEE Trans. Magn.* **49**, 4265 (2013).
- [7] O. Kimura, K. Shoji, and H. Maiwa, *J. Eur. Ceram. Soc.* **26**, 2845 (2006).
- [8] L. B. Kong, Z. W. Li, L. Liu, R. Huang, M. Abshinova, Z. H. Yang, C. B. Tang, P. K. Tan, C. R. Deng, and S. Matitsine, *Inter. Mater. Rev.* **28**, 203 (2013).
- [9] M. A. Vinnik, *Russ. J. Inorg. Chem.* **10**, 1164 (1965).
- [10] Z. W. Li, Y. P. Wu, G. Q. Lin, and L. F. Chen, *J. Magn. Magn. Mater.* **310**, 145 (2007).
- [11] T. Wu, H. Su, Q. Ding, H. Zhang, Y. Jing, and X. Tang, *Phys. B* **429**, 85 (2013).
- [12] K.-S. Moon, Y.-M. Kang, I.-T. Han, and S.-E. Lee, *J. Appl. Phys.* **120**, 194102 (2016).
- [13] J. Li, H.-F. Zhang, G.-Q. Shao, D. Chen, G.-G. Zhao, Z.-S. Gao, J.-H. Liu, J.-S. Lu, and X.-B. Li, *Proc. Eng.* **102**, 1885 (2015).
- [14] J.-T. Lim, I.-B. Shim, E. J. Hahn, and C. S. Kim, *AIP Adv.* **7**, 056108 (2017).
- [15] M.-H. Park and Y.-M. Kang, *J. Magn. Magn. Mater.* **491**, 165628 (2019).
- [16] X. Sun, J. He, G. Li, J. Tang, T. Wang, Y. Guo, and H. Xue, *J. Mater. Chem. C* **1**, 765 (2013).
- [17] L. Kong, X. Yin, X. Yuan, Y. Zhang, X. Liu, L. Cheng, and L. Zhang, *Carbon* **73**, 185 (2014).
- [18] X. Liang, W. Liu, Y. Cheng, J. Lv, S. Dai, D. Tang, B. Zhang, and G. Ji, *J. Alloy. Compd.* **749**, 887 (2018).
- [19] Y. Naito and K. Suetake, *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **19**, 65 (1971).