

Fabrication and EMI Absorption and Shielding Properties of Hexaferrite-CNT-Rubber Composite Films

Young-Min Kang

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

Ji-Eun Yoo and Sang-Min Lee*

Industry-Academy Cooperation Foundation, Korea National University of Transportation, Chungju 27469, Korea

(Received 6 October 2021, Received in final form 11 November 2021, Accepted 15 November 2021)

M-type hexaferrite ($\text{SrFe}_{9.6}\text{Co}_{1.25}\text{Ti}_{1.25}\text{O}_{19}$) powders having an electromagnetic (EM) wave absorbing capability at X-band (8~12 GHz) were dispersed with 2 wt% multi-walled carbon nanotubes (CNT) and rubber binder into a solvent to prepare a coating solution, and then composite films having a thickness of ~100 μm were coated on polyimide (PI) film using a coating applicator. After curing the sample at 80 °C for 10 min, flexible hexaferrite-CNT-rubber composite films could be obtained. The X-ray diffraction analysis revealed that the ferrite particles in the composite film had randomly oriented single-phase M-type type hexagonal structure. Microstructure and thickness of the film were confirmed through scanning electron microscope (SEM) analysis. EM wave shielding and absorbing properties were measured by the S-parameter method using a network analyzer. A single layer of composite film (100 μm) exhibited a shielding effectiveness (SE) of -15 dB. A 1.7 mm-thick sheet laminated with the composite films exhibited a SE < -30 dB and a reflection loss (RL) of -7 dB at full X-band, which implies that it blocks more than 99.9% and absorbs ~90% of the incident EM wave energy. In addition, a SE of ~-70 dB could be achieved when a 12 μm -thick copper foil was attached to a single layer of composite film (100 μm).

Keywords : hexaferrite, composite film, EM shielding, EM absorption, shielding effectiveness, reflection loss

Hexaferrite-CNT-Rubber 복합 필름의 제조와 전자기파 흡수 및 차폐 특성

강영민

한국교통대학교 응용화학에너지공학부 에너지소재공학전공, 충북 충주시 대학로 50, 27469

유지은 · 이상민*

한국교통대학교 산학협력단, 충북 충주시 대학로 50, 27469

(2021년 10월 6일 받음, 2021년 11월 11일 최종수정본 받음, 2021년 11월 15일 게재확정)

X-band(8~12 GHz)에서 우수한 전자기파 흡수능을 갖는 M-형 hexaferrite $\text{SrFe}_{9.6}\text{Co}_{1.25}\text{Ti}_{1.25}\text{O}_{19}$ 분말과 다중벽 탄소나노튜브(2 wt%)를 고무 바인더와 함께 용매에 분산하여 코팅액을 만들고, 코팅 applicator를 활용하여 hexaferrite-CNT-rubber 복합 필름을 polyimide(PI) 필름 위에 코팅하였다. Box 오븐에서 80 °C, 10분간 열처리 후 100 μm 두께의 복합 필름을 최종적으로 얻었다. X선 회절 분석을 통해 필름 속의 자성 입자가 배향성이 없는 단상의 M-형 hexaferrite 구조임을 확인하였고, 전자현미경(SEM) 분석을 통해 미세 구조와 필름의 두께를 확인하였다. 네트워크 분석기를 활용하여 S-parameter법으로 전자기파 흡수 특성과 차폐 특성을 측정하였다. X-band 대역에서, 100 μm 두께의 단일 복합 필름은 SE = -15 dB 정도의 차폐 특성을 보였으며, 필름을 적층시켜 1.7 mm 두께의 시트로 제작하였을 때 차폐 특성은 SE < -30 dB(99.9% 이상의 차폐), 흡수 특성은 RL = -7 dB(80% 에너지 흡수) 수준을 보였다. 또한 단일 필름(100 μm)에 12 μm Cu foil을 부착하였을 때 SE = -70 dB 수준의 매우 우수한 차폐 특성이 얻어졌다.

주제어 : 육방정페라이트, 복합 필름, 전자기파 차폐, 전자기파 흡수, 차폐능, 반사 손실

I. 서 론

최근 통신 기기, 사물 인터넷, 자동차 전장화 부품 등 여러 분야에서 전자기파 방출량이 증가하면서 이에 대한 전자부품 및 회로 내 또는 상호 간에 전자기 간섭(Electromagnetic interference, EMI)의 문제가 대두되고 있다[1,2]. 전자기파(Electromagnetic wave)의 차폐는 전기전도도가 높은 금속을 이용하여 전자기파를 반사시키는 방법과 전자기파의 흡수와 반사를 모두 활용하는 방법이 있다. 전자의 경우 전자기파의 발생원 주변에 금속 쉴드캔(shield can)이나 금속 박막을 통해 전자기파를 차단하는데, 반사되는 전자기파가 근처의 다른 회로에 또 다른 EMI 문제를 발생시킬 수 있으므로 이런 경우 흡수 기능을 포함하는 차폐재를 활용하는 것이 더 선호된다. 전자기파의 차폐와 흡수는 네트워크 분석기를 활용하여 2개 port에서 상호 주고받는 전기 신호의 입출력 강도의 비를 나타내는 S-parameter의 측정을 통해 가능하다. 먼저 전자기파 차폐능(shielding effectiveness, SE)은 port 1에서 차폐재를 통과하여 port 2로 전기 신호를 보낼 때 입력 대비 출력 강도의 비로 아래 식에 의해 데시벨(dB) 단위로 얻는다[3].

$$SE \text{ (dB)} = S_{21} = 20 \log (E_2/E_1) \\ = 20 \log (H_2/H_1) = 10 \log (P_2/P_1) \quad (1)$$

여기서 E는 전기장, H는 자기장, P는 전력을 의미한다. 한편 전자기파의 흡수 성능은 반사 손실(Reflection loss, RL)을 통해 평가하는데 완전 반사가 가능한 금속 반사판에 부착된 흡수체 샘플을 준비하여 한 포트(port 1)에서 전기신호를 보내고 흡수체 내부를 지나 금속판에서 반사되어 port 1로 되 돌아오는 전기 신호 강도의 비(S11)를 측정하여 평가가 가능하다. RL은 아래 식으로 표현된다[4].

$$RL \text{ (dB)} = S_{11} = 20 \log (E_{\text{return}}/E_i) = 10 \log (P_{\text{return}}/P_i) \quad (2)$$

아래 Fig. 1(a)와 Fig. 1(b)는 동축(co-axial) air-line이 네트워크 분석기의 각 port에 연결되어 있을 때 S21, S11 값을 통해 SE와 RL을 얻는 개념도를 보여준다.

고주파에서 전자기파의 흡수는 흡수체의 복소 유전율($\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon''$)과 복소 투자율($\mu_r = \mu' - j\mu''$) 값에 따라 결정된다. 흡수체 내에 유전적(dielectric), 도전적(conducting), 그리고 자기적(magnetic) 손실 기구들이 존재할 때 주파수에 따른 유전율의 허수부(ϵ'') 및 투자율의 허수부(μ'')의 값을 가지게 되며

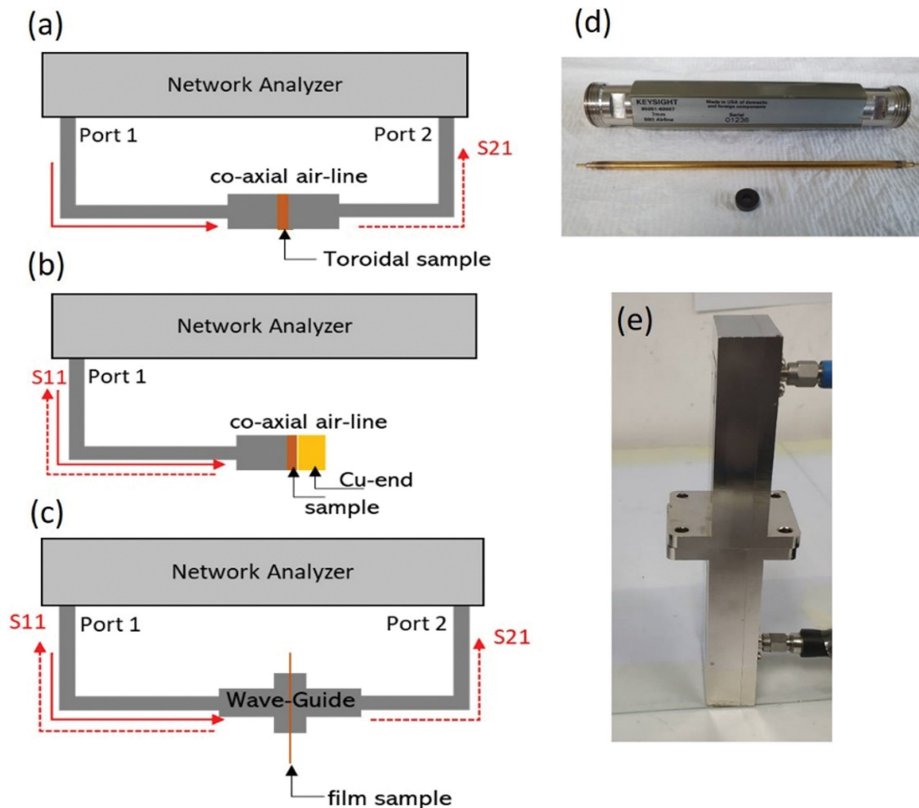


Fig. 1. (Color online) Schematic illustration of network analyzer for (a) S21 (= SE) and (b) S11 (= RL) measurements using a co-axial air-line fixture and that for (c) S11 and S21 measurements for film sample with a wave guide fixture and photos of a co-axial air-line (d) and a wave-guide (e) fixtures.

이들에 의해 전자기파의 에너지를 흡수하여 열적에너지로 변환하여 방출하게 된다[4,5]. 높은 전자기파의 흡수가 일어나기 위해서는 임피던스 정합(impedance matching) 특성이 매우 중요한데 이는 해당 주파수에서 ϵ' , ϵ'' , μ' , μ'' 의 상대적인 크기와 흡수체의 두께(d) 관계에 의해 결정된다. Fig. 1(b)의 구조에서 Eq. (2)와 같이 S-parameter 측정에 따라 RL을 얻을 수도 있으나, 주파수에 따른 복소 유전율(ϵ' , ϵ'')과 복소 투자율(μ' , μ'') 값을 측정해 전송선 이론을 활용하여 아래 식과 같이 RL을 계산할 수 있다[6].

$$RL (dB) = 20 \log \left| \frac{\frac{Z_{in} - Z_0}{Z_0}}{\frac{Z_{in} + Z_0}{Z_0}} \right| \quad (3)$$

여기서 $Z_0 = \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$ 는 자유공간에서 임피던스, Z_{in} 은 흡수체의 input 임피던스이며, Z_{in}/Z_0 는 다시 아래 식으로 표현된다.

$$\frac{Z_{in}}{Z_0} = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tanh \left[j \left(\frac{2\pi f d}{c} \right) \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \right] \quad (4)$$

여기서 ϵ_r 은 상대 복소 유전율($\epsilon' - j\epsilon''$), μ_r 은 상대 복소 투자율($\mu' - j\mu''$)이며, f 는 입사 전자기파의 주파수, c 는 빛의 속도, d 는 흡수체의 두께이다. Eq. (3), Eq. (4)에 의해 흡수체의 ϵ' , ϵ'' , μ' , μ'' spectra를 얻으면 임의의 두께에 대해 RL 값을 주파수(f)와 두께(d)의 함수로 얻을 수 있게 된다. 선행 연구에서 Fig. 1(b)의 구조에서 S-parameter 측정과 유전율 및 투자율로부터 계산에 의한 RL spectra가 서로 거의 일치함을 보였다[7].

전자기파 흡수체로 주목 받는 소재 중에 하나로 육방정페라이트(hexaferrite)는 영구자석 및 자기기록 매체, 통신 기기, 자동차 전장 부품 등 다양한 분야에서 활용되고 있다[8,9]. Hexaferrite는 화학 조성 및 적층 구조에 따라 M, U, W, X, Y, Z형의 6개의 서로 다른 유형(type)을 갖는데 이 중에서도 M형 육방정 페라이트의 경우 상 안전성이 우수하고, 높은 포화자화 값과 c-축 결정자기이방성(magneto crystalline anisotropy)으로 인해 영구자석 분야에서 많이 활용되고 있다[10,11]. 또한 수~수 십 GHz 대역에서 발생하는 강자성공명(ferromagnetic resonance) 현상과 조성 치환을 통한 흡수 주파수 대역의 조절을 통해 GHz 대역의 전자기파 흡수체로도 많은 연구가 이루어지고 있다[12-16].

본 연구에서는 선행 연구[7]를 통해 X-band 대역(8~12 GHz)의 전자기파 흡수체로 최적화 개발된 조성인 hexaferrite ($\text{SrFe}_{9.6}\text{Co}_{1.25}\text{Ti}_{1.25}\text{O}_{19}$) + CNT(2 wt%) 분말을 유연성이 높은 고무 기재와 복합화 및 분산하여 코팅액을 만들고 이를 필름을 제작하는 공정을 개발하고자 하였다. 최적 공정에서 제조

된 필름에 대해 SE와 RL을 측정하여 전자기파 차폐 및 흡수 성능을 평가하였다. CNT는 전기전도성이 매우 우수한 첨가제로 소량의 첨가(1~3 wt%)로 투자율 특성을 크게 변화시키지 않고 고주파 유전특성이 크게 증가하는 결과를 얻었으며, 2 wt%를 첨가했을 때 두께 1.5 mm 이내의 두께에서 비첨가 시 보다 전자기파 흡수능과 차폐능이 모두 향상되는 결과를 얻었다. 또한 차폐 성능을 향상시키기 위해 복합 필름에 동박(Cu foil)에 부착하여 2층 구조의 필름으로 제작하였고, 이에 대해 S-parameter를 측정하여 전자기파 흡수 및 차폐 특성도 평가하였다.

II. 실험 방법

Hexaferrite, $\text{SrFe}_{9.6}\text{Co}_{1.25}\text{Ti}_{1.25}\text{O}_{19}$ 조성을 고상법으로 합성하였다. 전구체 분말로는 Fe_2O_3 (Kojundo Chemical, 99.9%), SrCO_3 (Kojundo Chemical, 99.9%), Co_3O_4 (Sigma-Aldrich, 99%) 그리고 TiO_2 (Sigma-Aldrich, 99.9%)를 사용하여 각각 양이온을 조성비에 따라 칭량하였다. 칭량된 분말을 지르코니아 볼과 증류수와 함께 용기에 넣고 습식 밀링법(Ball milling)으로 24시간 혼합하였다. 혼합된 분말을 공기 중 120 °C에서 건조한 뒤 1100 °C에서 4시간 동안 1차 하소를 진행하였다. 하소된 분말을 분쇄(hand grinding)한 뒤 다시 습식 Ball milling 및 건조를 진행하였다. 건조된 분말을 알루미늄 도가니에 담아 열처리로에 넣고 공기 중에서 1250 °C에서 2시간 동안 2차 하소를 진행하였다. 2차 하소가 완료된 페라이트 분말을 유발에 넣고 hand grinding하여 # 200 mesh로 sieve하여 분말을 얻었다. 이후 페라이트 분말과 다중벽 카본나노튜브(CNT, Jeno tube 20, Jeio사, Korea)를 98:2의 중량비(wt%)로 혼합 후, 혼합 분말 무게 대비 19 wt%의 고흥 고무(Kraton, Kraton Polymers, USA)를 녹인 Toluene(> 99.8%, 대정화금, Korea)에 혼합 분말을 넣고 Rotate Mill(RRG 100, Armstec, Korea)을 활용하여 분산 및 milling을 진행하였다. 용매로 사용된 Toluene은 혼합 분말 무게의 100 wt%를 사용하였다. Milling 과정에서 혼합된 혼합액이 층 분리가 일어나지 않는지 확인하기 위해 한 시간 단위로 혼합된 혼합액을 각각 용기에 담아 침전물을 확인하였으며, 10시간 이상 두어도 원료가 침전물 및 혼탁 현상 없이 균일하게 분산되는 조건을 최종 milling 시간으로 선정하였다. 분산이 완료된 코팅액을 평평한 유리판 위에 고정된 Polyimide(PI) 필름(75 μm) 위에 붓고 applicator를 활용하여 100 μm 두께로 코팅하였다. 코팅된 필름을 Box 오븐에 넣고 대기 분위기, 80 °C, 10 min 동안 curing하여 최종 hexaferrite-CNT-rubber 복합 필름을 얻었다. 또한, 최종 복합필름에 12 μm 두께의 압연 Cu-foil (> 99.9%)을 필름용 접착제(pressure sensitive adhesive)로 부

착하여 2층 필름을 제작하였다.

제조된 필름의 결정상 분석은 Cu K_{α} ($\lambda = 0.154056$ nm) 선을 방출하는 X-선 회절분석기(XRD, D8Advance, Bruker)를 사용하여 진행하였으며, 전자현미경(SEM, JSM-7610F, JEOL)을 활용하여 복합 필름의 미세 구조를 관찰하였다. 네트워크 분석기(E50356A, Keysight)의 두 개 port에 동축(co-axial) air-line(85052BR03, keysight 사) 또는 도파관(wave-guide) fixture를 별도로 연결하여 전자기파의 차폐 및 흡수 특성을 측정하였다. 동축 air-line 측정은 필름을 1.7 mm 두께로 적층한 시트에 대해 내경 3.04 mm, 외경 7.00 mm의 toroidal 형으로 punching 가공한 후 0.1~18 GHz 주파수 범위에서 측정하였고, 도파관 측정은 단일 필름을 fixture 중앙에 넣고 고정된 후 8~12 GHz 범위에서 S-parameter 법으로 측정하였다. Fig. 1(d) 및 Fig. 1(e)에 동축 air-line, 도파관(wave-guide) 측정 fixture들의 사진을 각각 제시하였다.

III. 결과 및 토의

Fig. 2는 최종 제조된 $SrFe_{9.6}Co_{1.25}Ti_{1.25}O_{19}$ -CNT(2 wt%)-rubber 복합 필름(100 μ m)의 X-선 회절 패턴을 보여준다. International Center for Diffraction Data(ICDD) pdf data (search number; SrM: 00-033-1340)를 활용하여 각 peak 매칭 및 각 결정면을 indexing 하였다. 단상의 결정질의 M-형 hexaferrite가 특정 결정면으로 배향되지 않고 random한 배향을 하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 3(a)~3(c)는 $SrFe_{9.6}Co_{1.25}Ti_{1.25}O_{19}$ 조성의 hexaferrite와 CNT(2 wt%) 복합 분말을 시간대 별로 milling하여 필름으로 제작한 복합 필름 표면의 SEM 사진이다. Milling 시간이 증

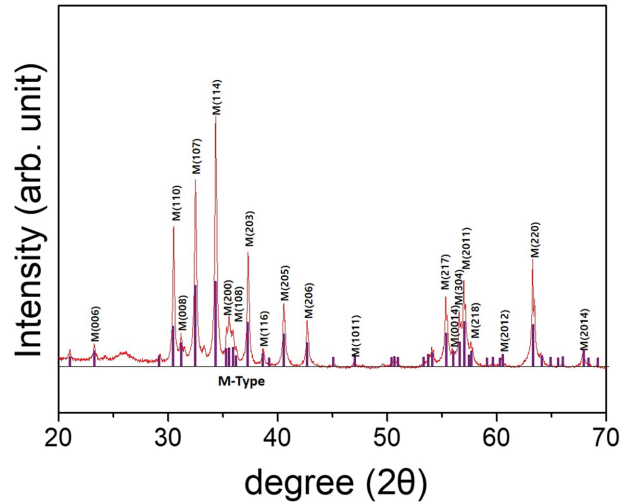


Fig. 2. (Color online) XRD pattern of $SrFe_{9.6}Co_{1.25}Ti_{1.25}O_{19}$ -CNT (2 wt%)-rubber composite film (100 μ m).

가할수록 결정립 크기가 작아지고 둥근 형태로 변화하는 것을 확인할 수 있었으며 결정립의 크기는 수 μ m 정도로 비교적 균일한 크기를 가지고 있는 것으로 보인다. 2시간 이내로 milling한 분말의 경우는 페라이트의 입자가 충분히 파쇄되고 분산되지 않았다. 이로 인해 결정립의 평균 입도가 크고 고르지 않아 코팅액 상에서 중력에 의해 아래로 침강되는 현상을 보였다. Fig. 3(d)는 3시간 milling 및 분산 후 applicator를 활용하여 PI 필름 위에 코팅하여 제조한 필름의 사진이며 Fig. 3(e)는 해당 필름의 두께 부분을 SEM으로 촬영한 사진이다. 페라이트 분말들이 치밀한 구조로 100 μ m 정도의 두께로 코팅이 이루어진 것을 알 수 있다. 80 $^{\circ}$ C에서 건조 후 복합 필름은 PI로부터 쉽게 떨어져 분리되었다.

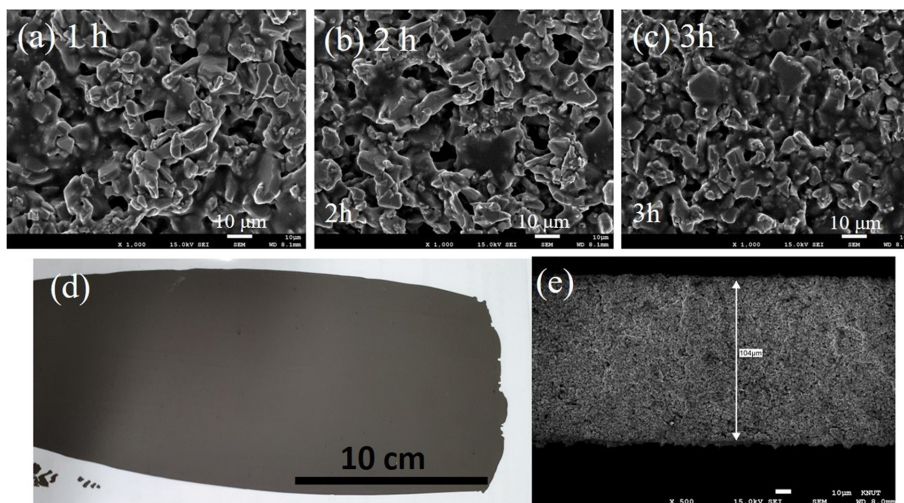


Fig. 3. (a-c) SEM micrographs of $SrFe_{9.6}Co_{1.25}Ti_{1.25}O_{19}$ -CNT(2 wt%)-rubber composite film with different milling time of 1 h, 2 h, and 3 h, and (d) a photo of film (3 h milling) after applicator-coating and curing, and (e) SEM cross-sectional image of the film.

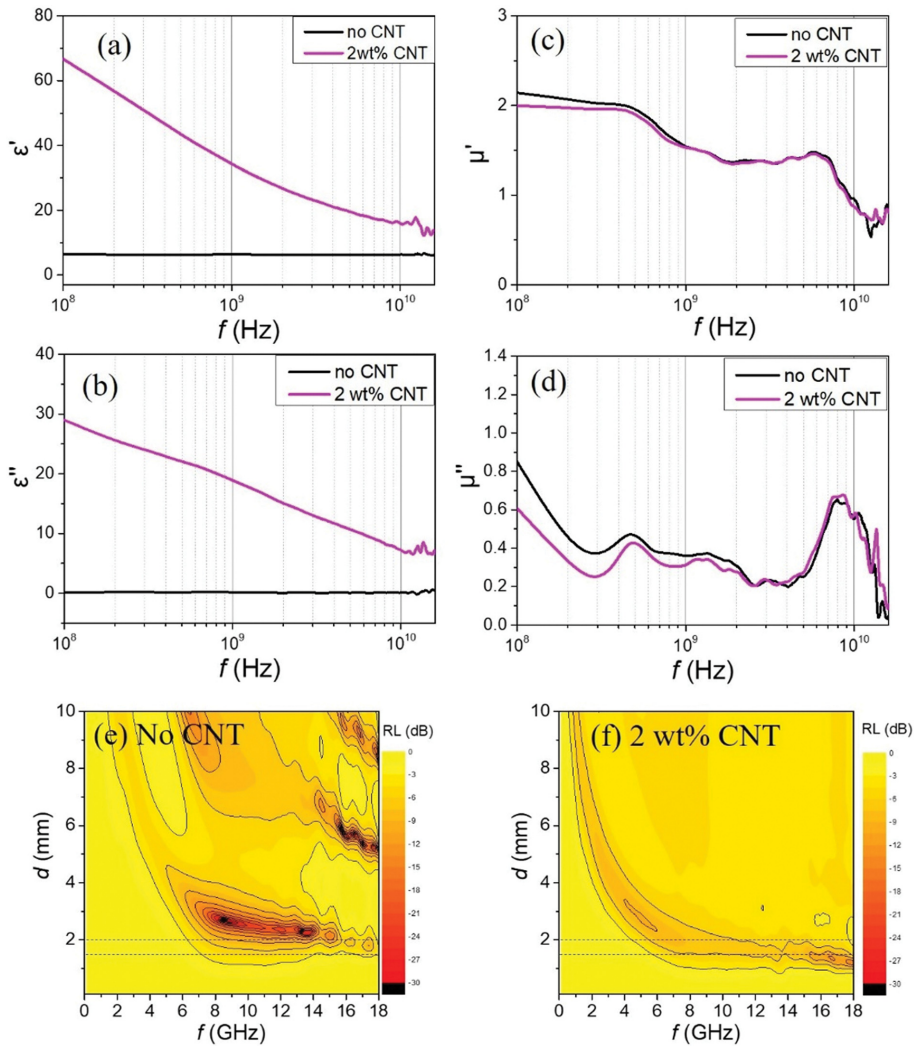


Fig. 4. (Color online) (a~b) complex permittivity (ϵ' , ϵ'') and (c, d) complex permeability (μ' , μ'') spectra ($0.1 \leq f \leq 18$ GHz) of the hexaferrite-epoxy (10 wt%) composites with and without 2 wt% CNT, and (e-f) RL maps of hexaferrite-epoxy composites with and without 2 wt% CNT [7].

Fig. 4는 본 연구팀의 선행 연구[7]에서 보고된 결과로, 동일 조성의 hexaferrite($\text{SrFe}_{9.6}\text{Co}_{1.25}\text{Ti}_{1.25}\text{O}_{19}$) 분말과 10 wt%의 에폭시 복합체의 복소 유전율과 복소 투자율의 spectra를 측정하고 이를 활용하여 계산하여 얻어진 주파수와 두께에 따라 전자기파 흡수 특성을 보여준다. 전자기파의 흡수능을 대변하는 RL 값은 서론에서 언급한 전송선 이론을 바탕으로 한 Eq. (4)와 Eq. (5)를 통하여 0~10 mm 두께 범위에서 주파수에 따른 RL 값을 계산하여 2D map으로 plot하여 Fig. 4(e), 4(f)에 나타내었다. Fig. 4(e)에 CNT가 첨가 되지 않은 경우 X-band를 포함하는 7~13 GHz 정도의 주파수 대역에서 높은 전자기파 흡수 특성이 얻어진다. 한편 2 wt%의 CNT를 첨가하게 되면 유전율의 실허수부가 크게 증가하고 RL map 상의 흡수 특성도 크게 달라지는데, 강한 전자기파 흡수가 일어나는 영역은 사라지나 RL map의 좌상-우하로 넓은 주파수 범위로 흡수가 일어나는 영역이 넓게 변화함을 알 수 있다.

Fig. 5(a)와 5(b)에서는 두께가 2 mm인 경우와 1.5 mm인 경우 각각 대해 2 wt% CNT 첨가 유무에 따라 변화하는 RL spectra를 보여준다. 곧, Fig. 4(e), 4(f)의 RL map 위에 표시된 2개의 line을 따라 얻어진 RL의 line profile이다. Fig. 5(a)의 두께가 2 mm인 경우는 X-band에서 CNT를 함유하지 않는 시료의 RL 값이 첨가한 시료들 보다 더 큰 음의 값을 가지나, 두께가 1.5 mm에서는 2 wt%의 CNT를 첨가한 시료가 첨가하지 않은 시료보다 전 주파수 범위에서 더 낮은 음의 RL 값을 갖는 것을 알 수 있다. 곧 두께가 1.5 mm 나 그 이하의 얇은 두께 에서는 2 wt%의 CNT를 포함했을 때 전자기파 흡수 특성이 더 우수함을 알 수 있다. Fig. 5(c), 5(d)에서는 S-parameter 범으로 S11 및 S21을 측정하여 RL과 SE spectra를 보여준다. 실 제조된 복합체의 두께는 CNT가 없는 경우 1.61 mm, 2 wt% CNT가 첨가된 경우 1.56 mm로 시료에 따라 큰 두께 차이는 없다. Fig. 5(c)에서 보는 바와

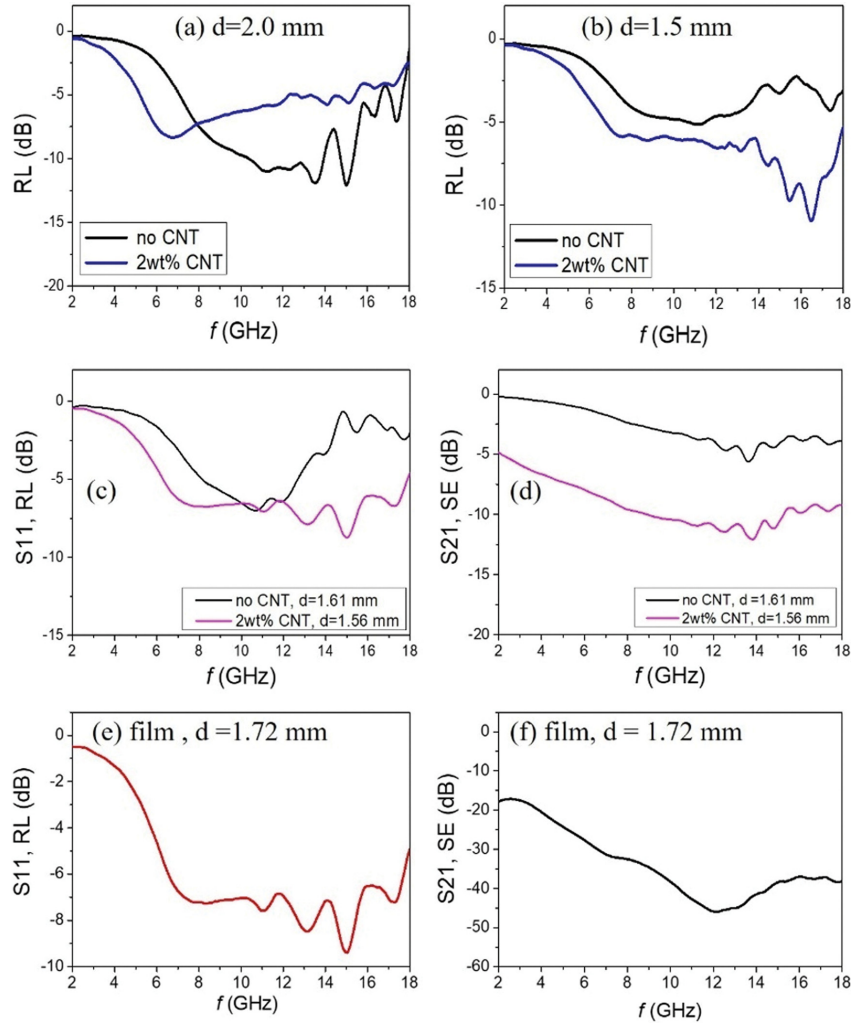


Fig. 5. (Color online) (a-b) Calculated RL ($d = 2.0$ and $d = 1.5$ mm) and measured (c) RL (= S11) and (d) SE (= S21) spectra ($2 \leq f \leq 18$ GHz) of the $\text{SrFe}_{9.6}\text{Co}_{1.25}\text{Ti}_{1.25}\text{O}_{19}$ -epoxy (10 wt%) composites with and without 2 wt% CNT [7], (e-f) measured RL and SE spectra ($2 \leq f \leq 18$ GHz) of $\text{SrFe}_{9.6}\text{Co}_{1.25}\text{Ti}_{1.25}\text{O}_{19}$ -CNT (2 wt%)-rubber composite sheet.

같이 2 wt% CNT를 첨가했을 때 X-band를 포함한 더 넓은 주파수 범위로 흡수 특성이 향상된다. Fig. 5(d)의 SE 특성도 CNT를 포함했을 때 월등하게 향상됨을 알 수 있다. 이상의 결과는 선행 연구 결과에서 얻어진 것으로 hexaferrite의 조성 및 CNT 함량에 따른 RL 및 SE 특성에 대한 보다 자세한 결과는 참고문헌[7] 논문에 제시되어 있다.

본 연구를 통해 제조한 $\text{SrFe}_{9.6}\text{Co}_{1.25}\text{Ti}_{1.25}\text{O}_{19}$ -CNT(2 wt%)-rubber 복합 시트에서 얻은 전자기파 흡수 및 차폐 특성은 Fig. 5(e), 5(f)에 제시하였다. 충분한 RL 특성을 얻기 위해서는 RL map(Fig. 4(f)) 상에서 알 수 있는 바와 같이 어느 정도의 두께가 필요하므로 100 μm 두께로 코팅한 필름을 적층하여 1.7 mm 두께의 시트를 얻었고, 이에 대해 S11, S21을 측정하여 RL 및 SE를 얻었다. 본 측정은 동축 air-line 측정법을 활용하였으며 측정에 대한 자세한 set-up은 Fig.

1(a), 1(b)를 참고하면 될 것이다. 해당 시트의 전자기파 흡수 특성은 X-band에서 $\text{RL} = -7$ dB(Fig. 5(e)) 수준으로 얻어지며, $\text{SE} < -30$ dB(Fig. 5(f))로 확인된다. 이는 해당 시트가 X-band 전 대역에서 80%의 전자기파 에너지의 흡수와 동시에 99.9% 이상의 전자기파 차폐가 가능함을 보여주는 결과이다.

Fig. 6(a)는 100 μm 두께의 $\text{SrFe}_{9.6}\text{Co}_{1.25}\text{Ti}_{1.25}\text{O}_{19}$ -CNT(2 wt%)-rubber 단일 복합 필름에서, Fig. 6(b)는 단일 복합 필름에 12 μm 두께의 Cu foil을 붙인 2층 필름에 대해 X-band 대역에서 S-parameter spectra를 측정된 결과이다. 필름 시료에 대해서는 도파관 측정 방식을 활용했으며 해당 측정에 대한 이해를 위해서는 Fig. 1(c), 1(e)를 참고하면 될 것이다. 먼저 단일 복합 필름에서 S12(또는 S21) spectra가 -15 dB 수준으로 얻어지는데 이는 전자기파의 에너지를 97% 차폐하는 수준으로 볼 수 있다. 필름에 대한 전자기파 반사 신호인

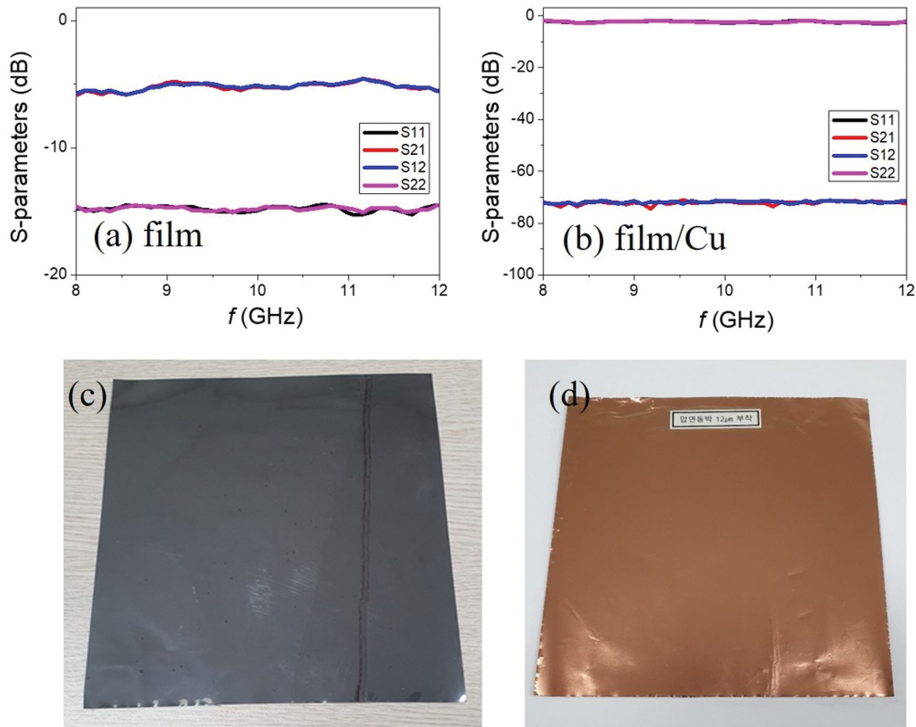


Fig. 6. (Color online) (a~b) S-parameter (S11, S21, S12, S22) spectra ($8 \leq f \leq 12$ GHz) of $\text{SrFe}_{9.6}\text{Co}_{1.25}\text{Ti}_{1.25}\text{O}_{19}$ -CNT (2 wt%)-rubber composite film (100 μm) and the same composite/Cu foil (12 μm) bi-layer, and (c~d) front and back side photos of the composite film/Cu foil bi-layer film.

S11, S22도 동일한 값으로 -6 dB를 보이며 이는 초기 입력 신호 대비 반사 신호에서 75% 감쇄되고 남은 25%의 에너지가 되돌아온다고 볼 수 있다. 복합 필름에 12 μm 의 Cu foil을 부착하게 되면 X-band에서 -70 dB 수준의 SE 특성을 보인다. 이는 99.99999%에 해당하는 전자기파 에너지를 차폐하는 것으로 Cu의 높은 반사 특성으로 인한 것으로 판단된다. 반면 S11, S22 spectra는 유사하게 0 dB에 가까운 값을 보이며 최적의 전자기파 흡수가 일어나기 위해서는 앞선 RL map에서 확인되는 바와 같이 임피던스의 matching 조건에 부합하는 특정 두께가 요구됨을 알 수 있다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 선행 연구에서 도출된 X-band 대역 전자기파 흡수능을 갖는 hexaferrite와 CNT 첨가제 조성의 분말을 유연한 고무 기재 속에 분산시킨 필름으로 개발하여 전자기파 흡수 및 차폐 특성을 연구하였다. Hexaferrite에 소량의 CNT 첨가는 차폐능을 향상시키며 1.5 mm 이하의 두께 범위에서 흡수능도 소폭 증가시키는 결과를 보인다. Hexferrite + 2 wt% CNT 복합 분말을 용매(toluene)에 녹아 있는 고무 바인더와 함께 혼합하고 rotate mill을 진행했을 때 시간에 따라 최적의 코팅 용액 제조 조건을 찾을 수 있었다. 코팅

applicator를 활용하여 100 μm 두께의 유연한 복합 필름을 제조하였고 XRD, SEM 구조 분석을 통해 단일 상의 hexaferrite 결정립이 치밀하고 균일하게 막을 형성함을 확인할 수 있었다. 네트워크 분석기를 활용하여 동축 air-line 및 도파관 법으로 적층 시트와 단일 복합 필름에 대해 전자기파 흡수 및 차폐 특성을 측정하였다. 1.7 mm 두께의 시트에서 X-band(8~12 GHz) 전 주파수 대역에서 80% 이상의 전자기파 에너지 흡수와 99.9% 이상의 차폐성능을 동시에 만족하는 것으로 확인되었으며, 단일 복합 필름(100 μm)에 12 μm Cu foil을 부착하였을 때는 SE = -70 dB 수준의 매우 우수한 전자기파 차폐 특성이 얻어졌다. X-band 대역에서 우수한 전자기파 차폐 및 흡수 특성을 갖는 Hexaferrite-CNT-rubber 복합 소재가 유연한 필름 또는 시트형으로 개발 가능함을 보인다. 본 연구의 의의가 있다.

감사의 글

필름 제조 공정에 도움을 주신 (주)코스모신소재 기술연구소 김성태 소장님께 감사드립니다. 본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단(NRF-2017R1C1B2002394) 및 산업통상자원부의 수송기계부품 전자파센터 구축 사업(G02P08370002002)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- [1] K. Joseph, R. Wilson, and G. George, *Materials for potential EMI shielding application: processing, properties and current trends*, Elsevier (2019).
- [2] X. C. Tong, *Advanced materials and design for electromagnetic interference shielding*, Boca Raton, CRC Press (2008).
- [3] MIL-STD-285, *Attenuation measurement for enclosures, electromagnetic shielding, for electronic test purposes, method of*, United states government printing office, Washington (1956).
- [4] 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).
- [5] M. Yamaguchi, Y. Miyazawa, K. Kaminishi, H. Kikuchi, S. Yabukami, K. I. Arai, and T. Suzuki, *J. Magn. Magn. Mater.* **268**, 170 (2004).
- [6] Y. Naito and K. Suetake, *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **19**, 65 (1971).
- [7] J.-K. Kim, P.-Y. Yu, and Y.-M. Kang, *J. Magn. Magn. Mater.* **537**, 168235 (2021).
- [8] R. C. Pullar, *Prog. Mater. Sci.* **57**, 1191 (2012).
- [9] 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).
- [10] J. Smit and H. P. J. Wijn, *Ferrites*, Philips Technical Library, Eindhoven (1959).
- [11] Y. Kobayashi, S. Hosokawa, E. Oda, and S. Toyota, *J. Jpn. Soc. Powder Metall.* **55**, 541 (2008)
- [12] S. Sugimoto, Y. Maeda, K. Okayama, T. Maeda, H. Ota, M. Kimura, D. Book, H. Nakamura, T. Kagotani, and M. Homma, *Mater. Trans. JIM* **40**, 887 (1999).
- [13] F. Tabatabaie, M. H. Fathi, A. Saatchi, and A. Ghasemi, *J. Alloy. Compd.* **470**, 332 (2009).
- [14] E.-S. Lim, H. K.D. Kim, and Y.-M. Kang, *J. Magn. Magn. Mater.* **517**, 167397 (2021).
- [15] J.-K. Kim, P.-Y. Yu, and Y.-M. Kang, *J. Magn. Magn. Mater.* **537**, 168235 (2021).
- [16] J.-U. Kim and Y.-M. Kang, *Appl. Sci.* **11**, 8669 (2021).