

광대역 레이다 흡수용 W-type 육방정 페라이트-에폭시 복합 소재

이수미¹ · 이태우¹ · 강영민^{1,†} · 김혜민²¹한국교통대학교 에너지소재공학전공²한국교통대학교 항공기계설계학과

W-type hexaferrite-epoxy composites for wide-band radar absorption

Su-Mi Lee¹ · Tae-Woo Lee · Young-Min Kang^{1,†} · Hyemin Kim²¹Department of Materials Science and Engineering, Korea National University of Transportation²Department of Aeronautical and Mechanical Design Engineering, Korea National University of Transportation

Abstract

In this study, hexagonal ferrite powder with chemical formula $\text{SrZn}_{2-x}\text{Co}_x\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ was synthesized by a solid-state reaction method and its electromagnetic (EM) wave absorption characteristics were evaluated in the frequency range of 0.1–18 GHz with absorber thickness range of 0–10 mm. Reflection loss (RL) affecting electromagnetic wave absorption performance was calculated based on the transmission line theory using measured complex permeabilities and permittivities. RL spectra were also directly measured for some samples. They were well matched with calculated results. High-frequency complex permeability characteristics were changed gradually according to the amount of Co substitution (x). The EM wave absorption frequency band could be tuned accordingly. Hexaferrite samples with $x = 1.0, 1.25, \text{ and } 1.5$ exhibited remarkable maximum electromagnetic wave absorption performances with minimum RL (RL_{\min}) lowered than -50 dB. They also showed a very broad frequency band ($\Delta f > 10$ GHz) in which more than 90% of the EM wave energy absorption occurred ($\text{RL} \leq -10$ dB).

초 록

본 연구에서는 $\text{SrZn}_{2-x}\text{Co}_x\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ 화학식을 갖는 육방정 구조의 페라이트 분말을 고상법으로 합성하고 Co-Zn 함량 변화에 따른 전자기파 흡수 특성을 0.1-18 GHz의 주파수 범위와 0~10 mm 흡수체 두께 범위에서 평가하였다. 흡수체 두께에 따른 전자기파 흡수 특성은 고주파 복소 투자율과 유전율 측정 data로부터 전송선 이론을 기반으로 계산을 통해 반사손실 (RL)을 도출하였으며, 일부 시료에 대해서는 RL 실측정을 통해 계산된 결과와 잘 맞는 것을 보였다. Co의 치환량 (x)에 따라 고주파 복소 투자율 특성이 변화하였으며 이에 따라 전자기파 흡수 주파수 대역의 조절이 가능하였다. 또한 $x = 1.0, 1.25, 1.5$ 시료에서는 매우 우수한 최대 전자기파 흡수 특성 ($\text{RL} = -70 \sim -50$ dB)을 보이며, 90% 이상의 전자기파 에너지를 흡수 ($\text{RL} \leq -10$ dB) 하는 주파수 밴드 폭 또한 10 GHz 이상으로 광대역 레이다 흡수가 가능함을 보였다.

Key Words : Radar-absorbing materials (레이다 흡수소재), W-type hexaferrites (W형 육방정페라이트), Reflection loss (반사손실), complex permeabilities (복소 투자율)

1. 서 론

레이다 흡수 소재 (Radar absorbing materials, RAM)는 항공기, 함선, 전차 등 군사/항공 스텔스 (stealth) 기술에 중요하게 사용되는 소재로 레이다 전파를 흡수하여 반사파를 최소화함으로써 적의 레이다 망에 의한

탐지를 무력화시키고 아군의 위치를 노출시키지 않게 한다[1]. 특히 최신 5세대 전투기들은 이러한 레이다 스텔스 성능을 필수적으로 갖추고 있어, 적에게 노출되지 않고 은밀하게 작전을 수행할 수 있다. 그러나 이러한 항공기 스텔스 기술에 대응하기 위한 카운터 스텔스 기술도 지속적으로 개발되고 있는데, 그 중 하나가 L 밴드 등의 저주파 대역 레이다이다. Table 1은

Received: Nov. 21, 2022 Revised: Dec. 27, 2022 Accepted: Dec. 29, 2022

† Corresponding Author

Tel: +82-43-841-5382, E-mail: ymkang@ut.ac.kr

© The Society for Aerospace System Engineering

Table 1 IEEE Radar letter-band nomenclature [4]

Band	Nominal frequency (MHz)	Band	Nominal frequency (GHz)
HF	3-30	X	8-12
VHF	30-300	Ku	12-18
UHF	300-1000	K	18-27
L	1000-2000	Ka	27-40
S	2000-4000	V	40-75
C	4000-8000	Mm	100-300

주파수 범위에 따른 다양한 레이더 분류를 보여준다. 일반적인 스텔스 항공기의 경우 X 밴드에서의 스텔스 성능을 갖추는 경우가 많은데, 이를 극복하기 위해 X 밴드 영역보다 낮은 주파수인 S, L 밴드 등의 주파수 대역에서 항공기를 탐지하는 시도가 이루어지고 있으며, 일부 사례에서 성공적으로 스텔스 항공기를 탐지하였다고 알려져 있다. 따라서 더욱 강력한 스텔스 항공기를 제작하기 위해서는 광대역 전파를 흡수할 수 있는 레이더 흡수 소재의 개발이 필수적이다.

전자기파가 특정 소재에 입사될 때 반사를 최소화하기 위해서는 임피던스 정합에 의해 표면 반사를 최소화하여야 하며 전자기파가 흡수체 내부로 진행할 때 전자기파를 흡수할 수 있는 기구 (mechanism)가 존재하여야 한다[2-3]. 전자기파는 전기장과 자기장으로 구성되어 있는 파동으로 전기장과 자기장이 공간과 시간에 따라 변화하면서 속도 $c = 2.998 \times 10^8$ m/s로 진행되는 일종의 전자기 에너지이다. 따라서 이러한 전자기파를 흡수하기 위해서는 재료 내에서 전하의 진동과 관련된 유전적인 손실, 또는 자성(magnetism)을 띠는 소재가 자기적 손실 기구에 의해 전자기파의 에너지를 열에너지로 변환시킬 때 가능하다.

전자기파를 흡수할 수 있는 자성 소재 중의 하나로 육방정 페라이트 (hexaferrite)는 페리자성을 띠는 소재로 화학 조성 및 적층 구조에 따라 M, U, W, X, Y, Z 형태의 6개의 서로 다른 유형 (type)으로 나뉜다. 이 중에서도 $SrZnFe_{16}O_{27}$ 또는 $SrCoFe_{16}O_{27}$ 를 기본 화학식으로 갖는 W형 육방정 페라이트의 경우 포화자화 및 고주파 투자율 값이 6개 유형 중 가장 높고 전자기파의 흡수 특성도 우수하다[5-6]. 전자기파 흡수 특성은 육방정 페라이트 분말과 에폭시 등과 같은 고분자 바인더 복합체를 제조하여 주로 평가하는데, 기존의 W형 육방정 페라이트 연구에서는 Zn 및 Co의 함량 변화에 따른 흡수 특성이 연구되어 있지 않다. Fig. 1에 육방정 페라이트를 구성하는 3개의 단위 Block (S,

R, T)를 표시하였다. 6개의 육방정 페라이트 유형의 단위포와 이러한 3개의 Block이 어떻게 적층 되는지를 그림의 표 안에 나타내었다. '*' 표시는 S, R, T 기본 Block 구조를 c-축을 중심으로 180도 회전한 것을 의미한다.

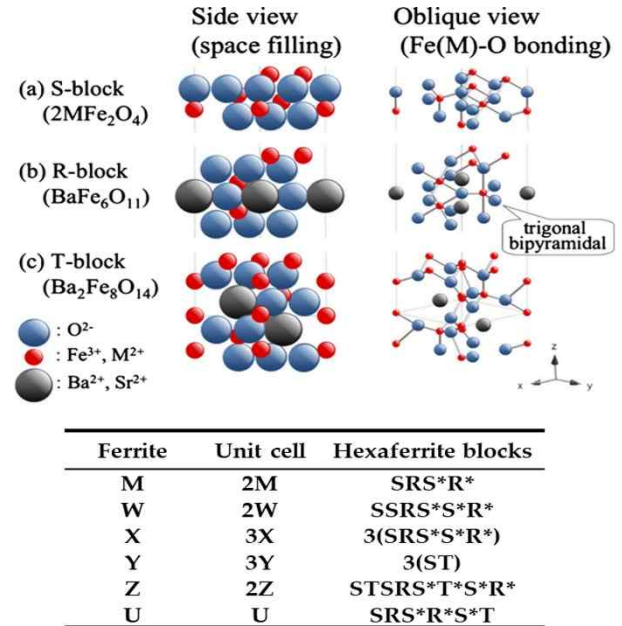


Fig. 1 Basic blocks that constitutes the hexaferrite structures [5]

본 연구에서는 높은 수준의 스텔스 성능을 갖춘 항공기 개발을 위해 광대역 레이더 흡수 물질을 소재적인 측면에 초점을 맞추어 연구하였다. 재료의 전자기적 특성이 변화될 때 전자기파의 흡수 특성이 어떻게 변화하는지를 연구하였다. 화학 조성 설계를 $SrZn_{2-x}Co_xFe_{16}O_{27}$ ($x = 0, 0.5, 1.0, 1.25, 1.5, 2.0$)로 하여 W형 육방정 페라이트 소재를 Zn-Co 원소 조성에 변화를 주어 W형 육방정 페라이트를 합성하고 고주파에서 투자율 특성 변화와 이에 따른 전자기파의 흡수 특성을 연구하였다. 전자기파의 흡수 대역이 조절 가능하고, 또한 보다 넓은 주파수 대역에서 전자기파의 흡수가 가능한 소재를 개발하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1 샘플 준비 방법

육방정 페라이트 복합상 $SrZn_{2-x}Co_xFe_{16}O_{27}$ ($x = 0, 0.5, 1.0, 1.25, 1.5, 2.0$)의 화학적 조성을 고상법으로 합성하였다. Fe_2O_3 (Kojundo Chemical, 99.9%), $SrCO_3$ (Kojundo Chemical, 99.9%), ZnO (Kojundo Chemical, 99.9%), CoO (산업용 분말, 유니온머티리얼 제공) 분말

을 화학량론 비율에 맞게 칭량하였다. 칭량 된 분말들은 ZrO_2 볼과 증류수와 함께 120 rpm, 20 시간 동안 습식 혼합 분쇄 (Ballmilling)을 실시하였다. 혼합된 분말은 $180^\circ C$ 에서 24시간 건조하였고 건조 후 분말을 알루미늄 도가니에 담아 공기 중에서 $1200^\circ C$, 4시간 동안 1차 하소하였다. 1차 하소 후 분말을 분쇄 (hand grinding) 하여 동일한 방법으로 각각 $1250^\circ C$, $1300^\circ C$ 공기 중에서 2시간 동안 2차 하소하였다. 열처리 과정은 $5^\circ C/min$ 로 승온하여 해당 온도에서 유지 후, 자연 냉각 (furnace cooling) 하였다. 2차 하소가 완료된 분말 90 wt%와 에폭시 바인더 (YD-014, Kukdo Chemical) 10 wt%를 유발에 넣어 고르게 혼합하여 도넛형 몰드 (내경 3.04 mm, 외경 7.00 mm)에 3.0 g 정도의 양으로 넣고 0.3 ton의 압력을 가하여 성형하였다. 이후 성형체를 건조기에 넣고 대기 중에서 $180^\circ C$ 로 20분 동안 열처리 (curing) 하였다. 이상의 시료 준비과정을 Fig. 2의 순서도로 나타내었다.

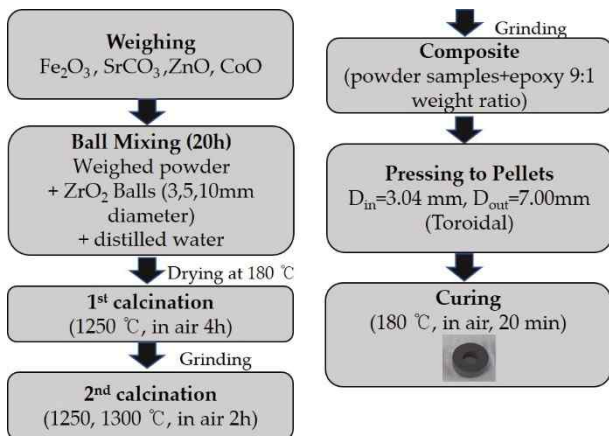


Fig. 2 Flow chart of sample preparation processes

2.2 샘플 평가 방법

결정상 분석은 2차 하소 후 확보된 분말들에 대해 $Cu K\alpha$ radiation ($\lambda = 0.154056$ nm)을 사용하는 X-선 회절기 (XRD, D8 Advance, Bruker)를 사용하여 진행하였다. 도넛형 (toroidal) 페라이트 분말-에폭시 복합체에 대해 복소 투자율 ($\mu = \mu' - j\mu''$)과 복소 유전율 ($\epsilon = \epsilon' - \epsilon''$)을 Vector Network Analyzer (VNA, E50356A, Keysight), 에어라인 키트 (85052BR03), N1500A software와 함께 사용하여 $0.1 \sim 18$ GHz 주파수 구간에서 측정하였다. 복합체의 Reflection Loss (RL)는 유전율과 투자율 spectra를 바탕으로 계산하였

고, 한 port Cu threaded hole socket을 사용하여 S11 parameter를 측정하였다. Fig 3(a)는 네트워크 분석기에 Air-line Fixture를 체결하여 유전율 및 투자율 측정 시 사진을 보여주며 Fig 3(b) Air-line Fixture와 측정용 샘플, 반사 손실 (RL) 실 측정 (S11)시 샘플에 붙여 완전 반사판으로 사용하는 Cu end socket 사진을 자세히 보여준다. Fig. 3(c)는 RL 실 측정 (S11) 시 VNA의 set-up 개략도를 보여준다.

3. 결과 및 토의

3.1 W형 육방정 페라이트 상합성 평가

Fig. 4 (a)와 (b)는 $SrZn_{2-x}Co_xFe_{16}O_{27}$ ($x = 0, 0.5, 1.0, 1.25, 1.5, 2.0$) 조성의 시료를 공기 중 $1200^\circ C$ 에서 1차 하소 후 각각 $1250^\circ C$, $1300^\circ C$ 에서 2차 하소한 분말의 XRD 회절 패턴이다. International Center for Diffraction Data (ICDD) pdf의 정보를 사용하여 각 시료의 회절 패턴 상에 회절면 peak를 matching하였다. $1250^\circ C$ 2차 하소한 시료의 경우 W상을 주상으로 하고 M상과 S상이 미량 존재하는 혼합상이며, $1300^\circ C$ 에서 하소한 시료는 단상의 W형 육방정 페라이트임이 확인되었다. 이상에서 본 연구에서 합성한 자성 분말은 거의 단상의 W형 육방정 페라이트이며, 이차상은 특성 변화에 영향을 주지 않을 만큼 미미한 양이 포함된 것으로 사료된다.

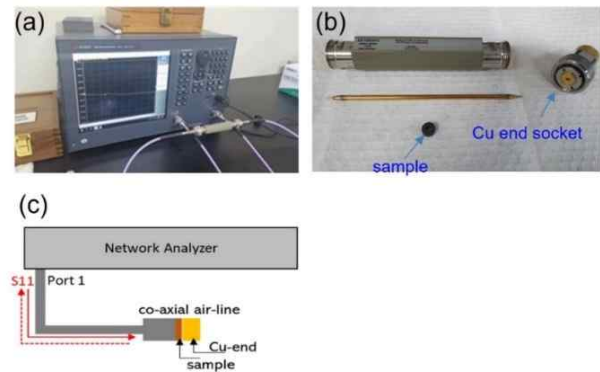


Fig. 3 (a) Photos of Vector Network Analyzer (E50356A, Keysight) and (b) air-line fixtures with toroidal samples, (c) a schematic of reflection loss (S11) measurement set-up

3-2. 고주파 유전율 및 투자율 특성 논의

Fig. 5(a-d)는 $1250^\circ C$ 에서 Fig. 6(a-d)는 $1300^\circ C$ 에서 각각 하소한 $SrZn_{2-x}Co_xFe_{16}O_{27}$ ($x = 0, 0.5, 1.0, 1.25, 1.5, 2.0$) 육방정 페라이트 분말-10 wt%의 에폭시 복합체의 복소 유전율 (ϵ', ϵ'')과 복소 투자율 (μ', μ'')의 spectra (0.1 GHz $\leq f \leq 18$ GHz)을

보여준다. 일반적으로 네트워크 분석기의 경우 4개의 S-parameter (S11, S12, S21, S22)를 측정하는 장치이나 본 연구에서는 장치 제조 업체에서 제공하는 N1500A software를 통하여 4개의 S-parameter로부터 복소 유전율과 복소 투자율 spectra를 바로 얻게된다. Table. 2에서 1 GHz에서 유전율 실수부 (ϵ')와 허수부 (ϵ''), 투자율 실수부 (μ'), 투자율 허수부의 peak (μ'' max)값을 제시하였다.

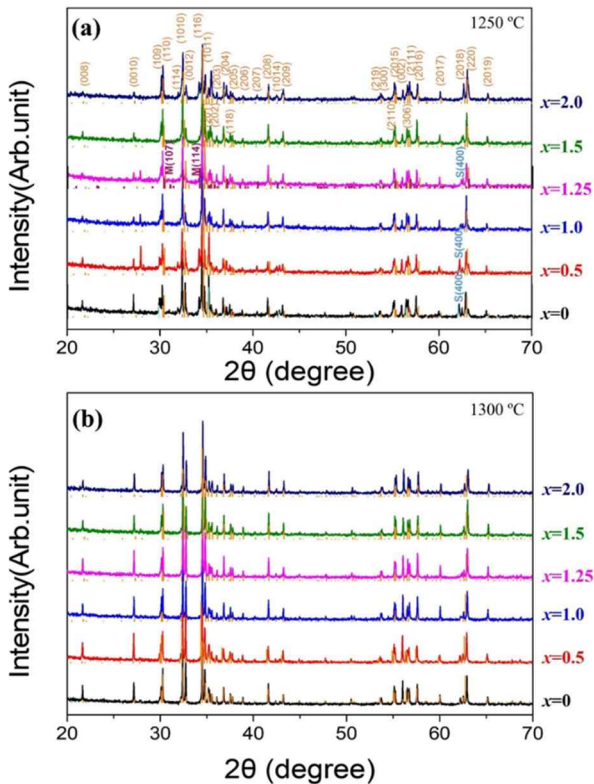


Fig. 4 (a, b) XRD patterns of SrZn_{2-x}Co_xFe₁₆O₂₇ (x = 0, 0.5, 1.0, 1.25, 1.5, 2.0) powders calcined at 1250 and 1300 °C

육방정 페라이트 GHz 대역의 전자기파 흡수는 자화 용이축을 중심으로 회전하는 전자 스핀의 공명현상 (Ferromagnetic resonance, 강자성 공명)을 통해 얻어진다. 따라서 μ'' max의 주파수는 강자성 공명 주파수 (f_{MR})와 같다고 볼 수 있다[7-9]. Fig. 5(a), 6(a)의 각 시료들의 유전율 실수부 (ϵ')는 측정 주파수 대역에서 큰 변화없이 $\epsilon' = 6.0 \sim 8.0$ 사이의 값을 보이며 Fig. 5(b), 6(b)의 허수부 유전율은, $\epsilon'' = 0 \sim 0.4$ 정도의 값을 보인다. ϵ' 값은 전기장 변화에 대응하여 전기 쌍극자가 분극 (polarization)을 통해 얻어지는 값이며 ϵ'' 값은 분극의 과정에서 전기장 쌍극자, 또는 전하가 운동하는 과정에서 발생하는 손실을 의미한다. 마찬가지로 μ' 는 자기장의 변화에 대응하여 전자 스핀 또는 자벽(magnetic domain

wall)이 운동하여 자화(Magnetization)에 기여함을 통해 얻어지는 값이며 μ'' 는 자화 반전 과정에서 전자 스핀 또는 자벽이 운동하면서 발생하는 손실을 의미한다. 따라서 전자기파의 흡수는 에너지의 손실과 관련된 ϵ'' 및 μ'' 값과 관련이 깊다[2,3,6]. 18 GHz 부근에서는 측정값에 노이즈가 확인되나 본 연구에서 흡수 특성 해석에는 큰 영향이 없었다.

투자율 실수부 (μ')와 허수부 (μ'')는 Fig. 5(c-d), Fig. 6(c-d)에 제시하였다. $x = 2.0$ 조성의 시료가 ϵ' spectra의 가장 낮은 지점을 차지하나 x 에 따른 ϵ' 변화에 특별한 경향성은 보이지 않고, ϵ'' 은 0에 접근한다. 2 GHz 이하의 주파수에서 보이는 μ' 및 μ'' 의 transition은 자벽의 진동과 연관되며, 2 GHz 이상의 고주파에서의 μ' , μ'' 값은 전자 스핀 운동에 의한 값이다. 특히 μ'' 의 peak는 강자성 공명에 의해 발생한다⁽⁷⁻⁹⁾. $x=1.0$ 시료의 경우 4 GHz 부근에서 μ'' peak을 보이며 μ'' max값이 가장 높다. x 가 1.0 이상으로 증가함에 따라 μ'' peak 주파수는 높은 주파수 방향으로 이동하고 peak의 높이가 작아짐을 볼 수 있다. Table 2에 주요한 유전율 투자율 data 곧, 1GHz 에서의 ϵ' , ϵ'' 및 μ' , 그리고 μ'' max 값과 그때의 주파수 $f_{\mu''\text{max}}$ 를 제시하였다.

3-3. 전자기파 흡수 특성 토의

Fig. 5(a-d) 및 Fig. 6(a-d)의 주파수에 따라 측정된 복소 유전율과 복소 투자율 값을 활용하여 전자기파 흡수 특성, 즉 반사손실 (Reflection loss, RL)을 계산하였고 이를 식 (1), 식 (2)의 전송선 이론[10]을 기반으로 한 계산에 의해 주파수 (f)와 10 mm이하 범위의 두께(d)의 함수인 2차원 map으로 plot하여 Fig. 7(a-d), Fig. 8(a-d)에 나타내었다.

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

$$L \text{ (dB)} = 20 \log \left| \frac{\frac{Z_{in}}{Z_0} - 1}{\frac{Z_{in}}{Z_0} + 1} \right|, \quad (2)$$

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 각각 복소 유전율과 복소 투자율, f 는 입사 전자기파의 주파수, c 는 빛의 속도, d 는 흡수체의 두께이다. 여기에서 측정된 ϵ' , ϵ'' , μ' 및 μ'' 값들을 식 (1)에 대입하여 10 mm 범위 내 임의의 두께 d 에 대한 Z_{in}/Z_0 값을 얻고 이를 식 (2)에 대입하여 RL spectra를 얻게 된다. RL map의 가장 바깥쪽 실선 내부 영역은 $RL \leq -10$ dB, 곧 전자기파의 에너지를 90% 이상 흡수하는 영역이며, 이 영역 내에서 $RL \leq -20$ dB은 다음 실선으로 나타내어 99% 이상 흡수하는 영역이 되며, 마찬가지로 $RL \leq -30$ dB, $RL \leq -40$ dB인 영역도

실선으로 표시하였는데, 이는 각각 99.9%, 99.99% 이상의 흡수능을 갖는 영역이다.

Fig. 7 및 Fig. 8의 전자기파 흡수 패턴을 전반적으로 비교하면 조성 x 에 따라 크게 변화하는 고유한 흡수 패턴이 형성됨을 알 수 있다. $x = 0$ 및 $x = 0.5$ 에서는 주목할 만한 흡수 영역이 없다가 x 가 증가함에 따라 점진적으로 오른쪽 영역으로 이동한다. 육방정 페라이트 소재에서 전자기파의 흡수 기구는 유전적인 손실기구보다 자기적인 손실 기구가

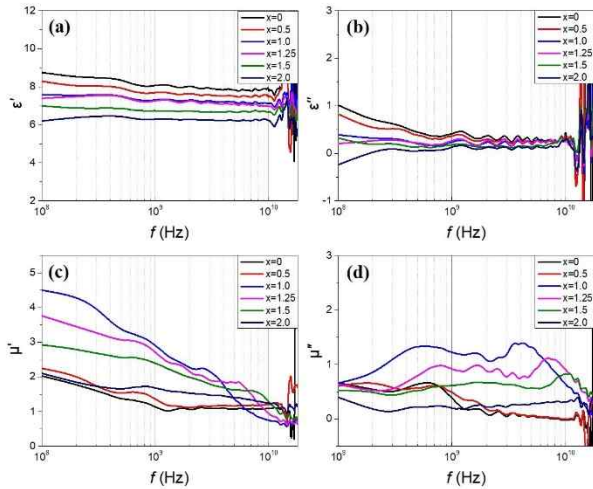


Fig. 5 (a–d) Real and imaginary parts of the complex permittivity (ϵ' and ϵ'') and permeability (μ' and μ'') spectra ($100 \text{ MHz} \leq f \leq 18 \text{ GHz}$) of the $\text{SrZn}_{2-x}\text{Co}_x\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ ($x = 0, 0.5, 1.0, 1.25, 1.5, 2.0$)-epoxy (10 wt.%) composites, where the hexaferrite powder was calcined at $1250 \text{ }^\circ\text{C}$

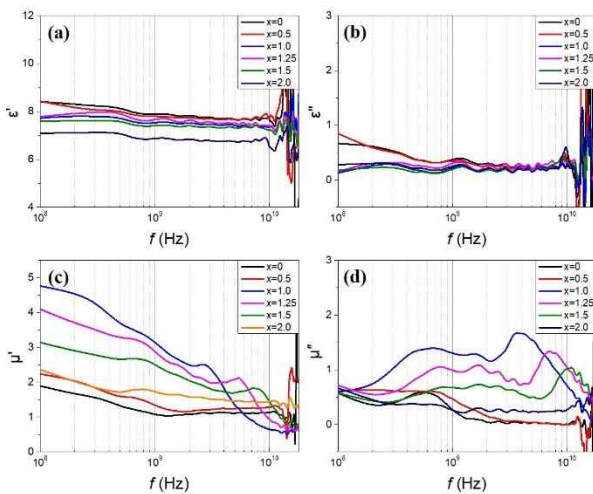


Fig. 6 (a–d) Real and imaginary parts of the complex permittivity (ϵ' and ϵ'') and permeability (μ' and μ'') spectra ($100 \text{ MHz} \leq f \leq 18 \text{ GHz}$) of the $\text{SrZn}_{2-x}\text{Co}_x\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$

$x\text{Co}_x\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ ($x = 0, 0.5, 1.0, 1.25, 1.5, 2.0$)-epoxy (10 wt.%) composites, where the hexaferrite powder was calcined at $1300 \text{ }^\circ\text{C}$

지배적으로 작용하기 때문에 이러한 흡수 특성의 변화는 투자율의 허수부 (μ'') spectra로부터 이해할 수 있다[11]. $x = 0$ 및 $x = 0.5$ 시료에서 특정 흡수 패턴이 나타나지 않는 이유도 Fig. 5(d) 및 Fig. 6(d)에서 이들 시료의 μ'' spectra에 peak이 없기 때문이다. 이는 W형 육방정 페라이트 $\text{SrZnFe}_{16}\text{O}_{27}$ 의 경우 강자성 공명 주파수가 $35 \sim 40 \text{ GHz}$ 정도이기 때문에 측정된 주파수 구간 ($100 \text{ MHz} \leq f \leq 18 \text{ GHz}$)에서 강자성 공명현상이 없기 때문이다. 가장 강한 흡수가 일어나는 주파수 대역은 $\text{RL} = -50 \text{ dB}$

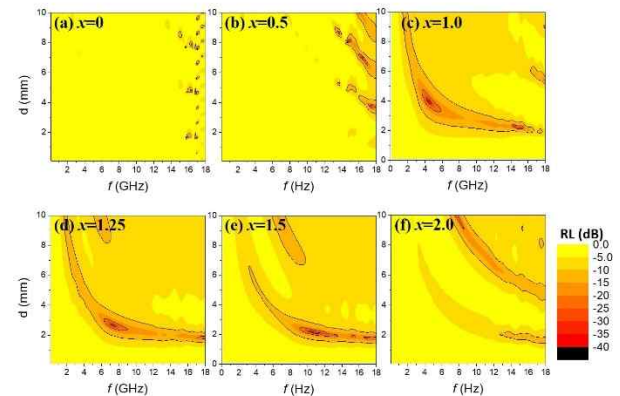


Fig. 7 (a–d) RL maps of the $\text{SrZn}_{2-x}\text{Co}_x\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ ($x = 0, 0.5, 1.0, 1.25, 1.5, 2.0$)-epoxy (10 wt.%) composites, where the hexaferrite powder was calcined at $1250 \text{ }^\circ\text{C}$

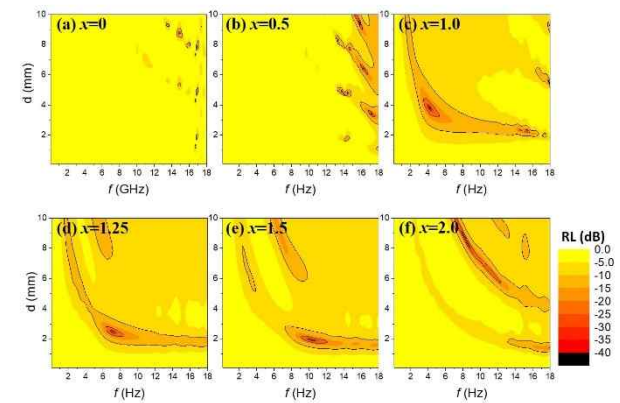


Fig. 8 (a–d) RL maps of the $\text{SrZn}_{2-x}\text{Co}_x\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ ($x = 0, 0.5, 1.0, 1.25, 1.5, 2.0$)-epoxy (10 wt.%) composites, where the hexaferrite powder was calcined at $1300 \text{ }^\circ\text{C}$

이하로 확인되며 Fig. 5(d) 및 Fig. 6(d)의 μ'' spectra에서 x 가 증가함에 따라 단계적으로 변화하는

Table 2 Real (ϵ') and imaginary (ϵ'') parts of the permittivities, μ' at 1 GHz, maximum μ'' value (μ''_{\max}), frequencies of the μ''_{\max} ($f_{\mu''_{\max}}$), minimum RLs (RL_{\min}), and frequencies ($f_{RL_{\min}}$) and thicknesses ($d_{RL_{\min}}$) of RL_{\min} of the $SrZn_{2-x}Co_xFe_{16}O_{27}$ ($x = 0, 0.5, 1.0, 1.25, 1.5, 2.0$)-epoxy (10 wt.%) composites, where the hexaferrite powders were calcined at 1250 and 1300 °C.

T_{cal} (°C)	x	ϵ' (1GHz)	ϵ'' (1GHz)	μ' (1GHz)	μ''_{\max}	$f_{\mu''_{\max}}$ (GHz)	RL_{\min} (dB)	$f_{RL_{\min}}$ (GHz)	$d_{RL_{\min}}$ (mm)
1250	0	8.01	0.373	1.08	-	-	-	-	-
	0.5	7.70	0.340	1.33	-	-	-	-	-
	1.0	7.32	0.305	3.13	1.39	4.28	-55.8	7.44	2.66
	1.25	7.27	0.248	2.87	1.12	7.05	-69.9	7.35	2.67
	1.5	6.74	0.226	2.50	0.826	10.9	-51.0	10.6	2.16
	2.0	6.30	0.195	1.72	0.395	12.9	-13.7	16.0	1.84
1300	0	7.90	0.369	1.08	-	-	-	-	-
	0.5	7.80	0.337	1.35	-	-	-	-	-
	1.0	7.67	0.301	3.14	1.67	3.66	-54.6	4.22	3.79
	1.25	7.54	0.243	2.89	1.34	7.03	-55.6	7.17	2.45
	1.5	7.41	0.220	2.51	1.04	10.9	-57.1	10.2	1.95
	2.0	6.88	0.189	1.73	0.488	15.0	-21.0	18.0	1.41

peak의 주파수 대역과 거의 유사하다. 이러한 결과는 자기적 손실 메커니즘, 즉 강자성 공명 주파수에 의해 발생한다. 자성 분말의 하소 온도 1250 °C가 1300 °C로 증가했을 때는 고유한 패턴이 그대로 유지되어 큰 차이를 보이지 않으나 면밀히 살펴보면 흡수 영역의 패턴이 전체적으로 낮은 두께 쪽으로 0.3 mm 정도 shift하였다. 이러한 차이는 1300 °C에서 자성 분말을 하소했을 때 μ'' 값이 1250 °C보다 크기 때문인데, 이는 투자율 값이 클수록 보다 낮은 두께로 동일한 흡수 특성의 흡수체를 제조할 수 있음을 의미한다. Fig. 9 (a,b) 1250 °C 및 1300 °C 에서 하소한 분말 시료 ($x = 1.0, 1.25, 1.5, 2.0$) 각각에 대해 최대 흡수능 (RL_{\min})을 가지는 두께 $d_{RL_{\min}}$ 에서의 RL spectra를 보여 준다. $x = 0$, 및 $x = 0.5$ 시료는 측정된 주파수 구간에서 특정한 흡수 영역이 없기 때문에 제외하였다. 여기서 RL_{\min} 값과 $f_{RL_{\min}}$ 은 Table. 2에 표시하였다. Fig. 9 (a) 및 Fig. 9(b) 공통적으로 $x = 1.0$ 에서부터 x 가 2.0까지 증가함에 따라 RL_{\min} 을 갖는 주파수 ($f_{RL_{\min}}$)는 단계적으로 고주파 방향으로 이동함을 알 수 있다. 이러한 변화도 역시 Fig. 5 (d), Fig. 6 (d) μ'' spectra에서 $f_{\mu''_{\max}}$ 의 단계적 이동에 그대로 대응됨을 알 수 있다. $SrZn_{2-x}Co_xFe_{16}O_{27}$ 의 $1.0 \leq x \leq 2.0$ 범위에서 Zn 자리에 Co가 치환량이 증가할수록 결정자기 이방성과 강자성 공명 주파수가 커지기 때문으로 해석된다. 하소 온도가 1250 °C에서 1300 °C로 증가되었을 때 차이는 최대 흡수가 일어나는 두께가 0.2 ~ 0.4 mm 정도 감소한 것이다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 하소 온도가 더 높을 때 재료의 투자율 절대 값이 증가했기 때문이다.

육방정 페라이트에서는 전자 스핀의 강자성 공명을 통해 전자기파와 상호작용하여 전자기파의 에너지를 흡수하는데 강자성 공명이 발생하는 주파수 (f_{MR})는 재료의 고유한 자기적 물성인 결정자기이방성 상수 (K)에 아래 수식과 같은 관계로 표현된다[12].

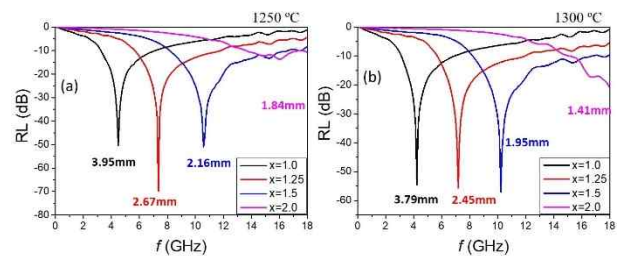


Fig. 9 (a,b) RL spectra of the $SrZn_{2-x}Co_xFe_{16}O_{27}$ ($x = 0, 0.5, 1.0, 1.25, 1.5, 2.0$)-epoxy (10 wt.%) composites at the optimal thickness, where the hexaferrite powder was calcined at 1250 and 1300 °C

$$f_{MR} = \frac{\mu_0 \gamma}{\pi M_s} K \tag{3}$$

여기서 μ_0 는 진공에서의 투자율, γ 는 자기회전비로 상수이며 M_s 는 재료의 포화자화 값이다. 결국, 양이온 치환양에 따라 재료의 고유한 자기적 특성이 단계적으로 변화하고, 이에 따라 강자성공명 주파수가 변화하여 전자기파를 흡수하는 주파수 대역이 변화하게 됨을 이해할 수 있다. 또한 Fig. 7 및 Fig. 8의 RL map에서

$x = 1.0, 1.25, 1.5$ 시료들은 $RL \leq -10$ dB 흡수 영역이 가로로 넓게 퍼져 있어 광대역 주파수 범위에서 90% 이상의 전자기파를 흡수할 수 있음을 한눈에 가늠할 수 있는데, 일부 시료에 대해 광대역 주파수에서 일어나는 두께 영역에서의 RL spectra를 도출하여 Fig. 10에 제시하였다. $x = 1.25$, 1250 °C에서 하소한, 두께 $d = 2.0$ mm 복합체 시료는 90% 이상 전자기파의 에너지를 흡수할 수 있는 주파수 범위가 $7.1 \leq f \leq 18$ GHz 이상으로 밴드폭 (Δf) >11 GHz이며, $d = 2.2, 2.4, 2.6$ mm 일 때는 각각 $6.5 \leq f \leq 16.9$ GHz, $6.1 \leq f \leq 14.9$ GHz, $5.7 \leq f \leq 10.0$ GHz으로 확인된다. $x = 1.5$ 시료의 경우는 $d = 1.75, 2.0, 2.25, 2.5$ mm 일 때 90% 이상 흡수 대역이 $9.7 \leq f \leq 18$ GHz 이상, $8.5 \leq f \leq 18$ GHz 이상, $8.0 \leq f \leq 15.7$ GHz, $7.4 \leq f \leq 9.8$ GHz로 얻어졌다. $x = 1.25$, 1300 °C에서 하소한 경우, $d = 1.8, 1.9, 2.0, 2.2, 2.4$ mm 일 때 흡수 대역은 각각 $7.0 \leq f \leq 18$ GHz 이상, $6.6 \leq f \leq 18$ GHz 이상, $6.3 \leq f \leq 18$ GHz 이상, $6.0 \leq f \leq 14$ GHz, $5.7 \leq f \leq 10.0$ GHz으로 1250 °C에서 하소한 경우 보다 대체로 얇은 두께에서 더 넓은 흡수 밴드폭이 얻어졌다. 특히 $x = 1.25$, 1300 °C 하소한 시료의 $d = 2.0$ mm 경우 X-band 전 대역을 포함한 6.3 GHz에서부터 18GHz 이상까지 밴드폭 12 GHz 이상에서 90% 이상의 흡수능을 보여 W형 육방정 페라이트가 광대역 RAM 소재로 매우 유망함을 보였다.

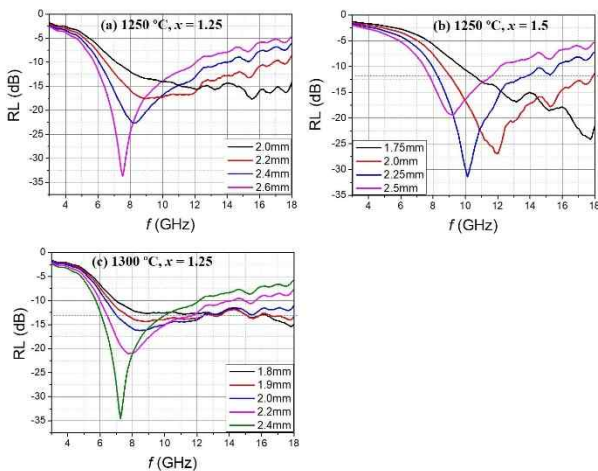


Fig. 10 (a–c) RL spectra of the $\text{SrZn}_{2-x}\text{Co}_x\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ ($x = 0, 0.5, 1.0, 1.25, 1.5, 2.0$)–epoxy (10 wt.%) composites at various thickness, where the hexaferrite powder was calcined at 1250 and 1300 °C

3-4. 타 흡수 소재와 비교 및 항공기 적용에 대한 논의

육방정 페라이트의 타 유형 (M, Y, W, Z) 소재와 대표적인 금속 자성 흡수체인 카르보닐철 (Carbonyl Fe), Fe–Al–Si 합금 (센더스트) 흡수체의 흡수 특성을 본 연구의 결과와 함께 Table 3에 제시하였다. W형

육방정 페라이트가 M, Y, W, Z형의 흡수체 보다 분자식에 자성 원소인 Fe 함량비가 높고 포화자화값이 높기 때문에 임피던스 정합 조건에서 전자기파의 흡수 특성도 보다 우수한 것으로 판단된다. 또한 산화물 보다 고가의 원료를 사용하는 카르보닐 철과 센더스트와 RL_{\min} 또는 $RL \leq -10$ dB를 만족하는 밴드 폭 특성을 비교했을 때도 우수한 특성을 가지고 있음을 알 수 있다. 항공기 스텔스 기능을 위한 RAM 소재로 적용을 위한 가장 일반적인 방법은 페라이트 분말을 고분자 바인더에 분산 배합하고 도료화하여 항공기 표면에 코팅하는 방법이 있다. 페라이트는 1200 °C 이상 고온에서 합성한 자성 세라믹 소재로 카르보닐철, 센더스트와 같은 금속 자성 소재보다 내산화, 내열 특성은 매우 우수하다. 다만 도료의 고분자 매질은 고온에 취약하므로 엔진 등과 같은 고온부에는 타일 형태의 페라이트 소결체로 적용하는 방안을 검토해 볼 수 있다. 본 연구의 육방정 페라이트의 경우 소결체와 같은 단일 세라믹 소재로 적용하게 되면 투자율이 크게 증가하여 보다 얇은 두께로 우수한 흡수 특성을 얻을 수 있다. 다만 소결체가 되면 복합체 보다 f_{FMR} 이 저주파 방향으로 shift[18]하기 때문에 조성적 제어는 필요할 것이다. 이러한 측면에서도 Zn의 치환함량에 따라 연속적으로 흡수 대역을 조절할 수 있는 W형 육방정 페라이트 $\text{SrZn}_{2-x}\text{Co}_x\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ 는 RAM 소재로 적용성에 큰 장점을 갖는다.

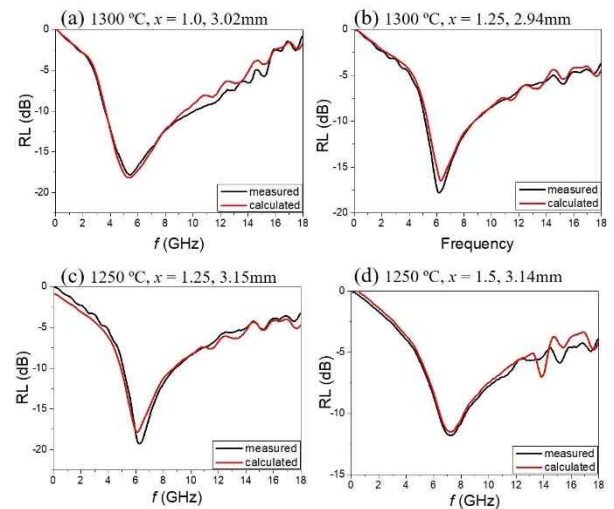


Fig. 11 (a–d) RL spectra of the hexaferrites–epoxy (10 wt.%) composites, obtained via calculations based on transmission line theory and the S11 measurement.

이상의 전자기파 흡수 특성에 대한 평가는 복소 유전율과 투자율 spectra를 바탕으로 임의의 두께에

Table 3 EM wave absorbing properties of various magnetic materials

EM wave absorbing magnetic materials	f_{FMR} (GHz)	d_m (mm)	RL _{min} (dB)	f_{RLmin} (GHz)	Absorbing f -band (GHz) @RL ≤ -10dB	ref. #
Mn-Ti BaM	7.2 10.0	2.68 2.18	-49 -30	11.3 15.0	7.2–12.5 9.5–17.0	[13]
Co-Ti SrM	6.4 8.2 15.0	3.1 2.7 1.5	-42 -40 -30	6.4 8.5 13.5	5.1–9.1 6.7–13.3 11.8–18이상	[9]
Zn-Zr SrM	8.3 10.8	2.7 2.0	-45 -39	8.8 11.8	7.5–14.7 10.2–18이상	[14]
BaZn ₂ Y	4.0	3.44	-58	9.5	4.7–10.8	[15]
SrZn ₂ W	-	1.95	-66	11.3	9.7–13.4	[16]
Sr ₃ Co ₂ Z	2.9	4.7 3.5	-51 -40	3.13 10.0	2.3–8.3 2.7–11.4	[11]
Carbonyl Fe	- -	1.6 2.0	-50 -42	10.2 6.5	7.7–14.0 5.0–8.9	[6]
Fe-Si-Al	-	2.0	-21	14.3	12.3–16.9	[17]
SrZn _{2-x} Co _x W (x=1.0) 1300	3.66	3.79	-55	4.22	3.0–7.0	본연구
SrZn _{2-x} Co _x W (x=1.25) 1250	7.05	2.67 2.0	-70 -16	7.35 8.4	5.6–11.7 6.3–18+	본연구
SrZn _{2-x} Co _x W (x=1.5) 1300	10.9	1.95	-57	10.2	8.1–17.1	본연구

RL 값을 계산하여 도출한 것이다. 재료의 유전율과 투자율 값은 재료의 고유한 값으로 두께에 따라 달라지지 않기 때문에 한 두께에서 복소 유전율과 투자율 값을 주파수에 따라 얻으면 식 (1)과 식(2)에 의해 임의의 두께에서도 RL spectra를 계산할 수 있었다. 이러한 계산 결과에 대한 신뢰성을 확인하기 위해 특정 두께의 시료를 제작하여 계산에 의한 결과와 실측정에 의한 RL spectra를 비교하여 Fig. 11 (a-d)에 제시하였다. 실측정의 경우는 Fig. 3(c)의 set-up을 통하여 이루어졌다. 완전 반사를 가정할 수 있는 Cu plate에 시료를 붙이고 네트워크 분석기의 1 port에서 S11을 측정된 spectra이다. 4개의 서로 다른 시료에 대해 각각 계산과 실측정을 통해 얻은 두 RL spectra가 거의 일치함을 알 수 있다. 이는 복소 유전율 및 투자율 spectra가 data에 대한 신뢰도는 매우 높은 것을 알 수 있으며 본 연구에서 진행된 모든 RL map, RL spectra 결과들이 믿을 만한 data임을 말한다.

4. 결 론

본 연구에서는 육방정 페라이트 SrZn_{2-x}Co_xFe₁₆O₂₇ (x = 0, 0.5, 1.0, 1.25, 1.5, 2.0)의 치환조성 (x) 및 하소 온도 (1250 및 1300 °C)에 따른 자성 분말-에폭시 (10 wt%) 복합체를 제조하여 전자기파 흡수능을 평가하였다. Zn의 자리에 Co가 치환됨에 따라 결정자기이방성 및 강자성 공명 주파수 (f_{FMR})가

변하고 이에 대응하여 전자기파를 흡수하는 주파수 영역이 연속적으로 변화함을 확인하였다. x = 1.0 시료에서 f_{FMR} 은 3.66 GHz였으나 x = 1.25, 1.5 로 증가함에 따라 f_{FMR} = 7.05, 10.9로 이동해 갔다. 이에 따라 전자기파의 최대 흡수가 일어나는 주파수도 f_{RLmin} 3-4 GHz 정도에서 10 GHz까지 단계적으로 변화하였다. 이러한 변화는 육방정 페라이트에서 전자기파 흡수는 자기적 손실 기구에 의해 지배적으로 이루어지며 투자율의 허수부 특성에 따라 조절이 가능하기 때문이다. 전자기파의 흡수정도를 주파수와 흡수체의 두께의 함수로 나타낸 RL map을 통해 전자기파의 흡수가 일어나는 영역을 확인할 수 있었으며 1.0 ≤ x ≤ 1.5 시료의 경우 RL ≤ -10 dB를 만족하는 영역, 곧 90% 이상의 전자기파를 흡수하는 영역이 가로로 길게 늘어진 형태, 곧 넓은 주파수 범위를 가지고 있음을 알 수 있었다. 계산과 실측 data의 비료를 통해 본 연구에서 유전율과 투자율 data로부터 계산한 RL 특성이 매우 신뢰할 만한 것임을 또한 확인할 수 있었다. W-형 육방정 페라이트의 전자기파 흡수 특성은 타 자성소재와 비교했을 때도 우수함을 알 수 있었다. 본 연구를 통해 확인된 W-형 육방정 페라이트의 능동적, 광대역 레이다 흡수 특성은 항공용 레이다 흡수 소재로서의 가능성을 보여주었다. 특히 육방정 페라이트 소재는 지구 상에 풍부하고 가격이 저렴한 산화철 (Fe₂O₃)을 주 원료로 하여 고상법으로 대기중 열처리만 합성할 수 있어 낮은 제조 비용 및 가공 용이성 등을 고려할 때 W-형 육방정 페라이트는 기존의 레이다 흡수 소재의 좋은 대안이라고 판단된다. 본 연구는 레이다

흡수 소재에 중점을 맞춘 연구로, 항공기의 종합적인 스텔스 성능을 확인하기 위해서는 본 소재를 적용한 전기체 스텔스 특성 등에 대한 추가적인 연구가 필요할 것이며, 이를 통해 보다 의미 있는 성능 향상도 도출할 수 있을 것이다.

후 기

이 논문은 2022년도 정부 (과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단 기본연구 사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2022R1F1A1062933)

References

- [1] G. A. Rao and S. P. Mahulikar, "Integrated review of stealth technology and its role in airpower," *The Aeronautical Journal*, vol.106, 629-642, Dec. 2002.
- [2] P. Saville, Review of radar absorbing materials, *Defense R&D Canada-Atlantic*, Jan. 2005.
- [3] F. Qin and C. Brosseau, "A review and analysis of microwave absorption in polymer composites filled with carbonaceous particles," *Applied Physics Review*, vol. 111, 061301, 2012.
- [4] I. M. Skolnik, *Radar Applications*, IEEE Press, New York, 1987.
- [5] R.C Pullar, "Hexagonal ferrites: A review of the synthesis, properties and applications of hexaferrite ceramics," *Progress in Materials Science* vol. vol. 57, 1191-1334, 2012.
- [6] 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, "Recent progress in some composite materials and structures for specific electromagnetic applications," *International Materials Reviews*, vol. 58, 203-259 Nov. 2013.
- [7] E.-S. Lim, H. KD Kim, Y.-M. Kang, "Control of electromagnetic wave absorption properties in La-Co-Ti substituted M-type hexaferrite-epoxy composites," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 517, 167397, 2021.
- [8] P.-Y. Yu, Y.-M. Kang, "Tuning of electromagnetic wave absorbing properties in Fe-deficient $\text{SrFe}_{9.6-x}\text{Co}_{1.2}\text{Ti}_{1.2}\text{O}_{19}$ hexaferrite-epoxy composites," *Current Applied Physics* vol. 31 99-104, 2021.
- [9] J.-K. Kim, P.-Y. Yu, Y.-M. Kang, "Electromagnetic wave absorbing properties of $\text{SrFe}_{12-2x}\text{Co}_x\text{Ti}_x\text{O}_{19}$ hexaferrite-epoxy composites," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 537, 168235, Nov. 2021.
- [10] Y. Naito, K. Suetake, "Application of ferrite to electromagnetic wave absorber and its characteristics," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 19, 65-72, 1971.
- [11] J.-H. Heo, J.-Y. You, Y.-M. Kang, "Synthesis, characterization, and electromagnetic wave absorption properties of $\text{Sr}_3\text{Co}_2\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$ hexaferrites," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 550, 169051, May 2022.
- [12] C. Kittel, *Introduction to Solid State Physics* (8th ed.), John Wiley & Sons, Inc, 2004.
- [13] S. Sugimoto, S. Kondo, K. Okayama, H. Nakamura, D. Book, T. Kagotani, M. Homma, "M-type ferrite composite as a microwave absorber with wide bandwidth in the GHz range," *IEEE. Transaction on Magnetics*, vol. 35, 3154 1999.
- [14] J.-U. Kim, Y.-M Kang, "Synthesis, Characterization, and Electromagnetic Wave Absorbing Properties of $\text{M}_{12+}\text{-M}_{24+}$ Substituted M-Type Sr-Hexaferrites," *Applied Science*, vol. 11, 8669, 2021.
- [15] J.-H. You, S. Choi, S.-Y. Park, S.-I. Yoo, "Enhanced microwave absorption properties of Zn-substituted Y-type hexaferrites," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 491, 165640, Dec. 2019.
- [16] S. Choi, J.-H. You, C. Y. Bon, S.-Y. Park, S.-I. Yoo, "Enhanced microwave absorption properties of Zn-substituted SrW-type hexaferrite composites in the Ku-band," *Ceramics International*, vol. 47, 7571, Mar. 2021.
- [17] L. Huang, X. Liu, D. Chuai, Y. Chen, R. Yu, "Flaky FeSiAl alloy-carbon nanotube composite with tunable electromagnetic properties for microwave absorption," *Scientific Reports* vol. 6, 35377, Oct. 2016.
- [18] M.-H. Park, Y.-M. Kang, "Fabrication and properties of Z-type $\text{Sr}_3\text{Co}_{2-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$ hexaferrites and their composites with epoxy," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 491, 165628, Dec. 2021.