

스핀 스프레이 방식으로 제조된 바륨계 페라이트 박막의 EMI (Electromagnetic Interference) 차폐 특성

오혜령, 박연주, 이우성, 유찬세, 유명재, 서인태 

한국전자기술연구원 융복합전자소재센터

EMI (Electromagnetic Interference) Shielding Properties of Barium-Based Ferrite Thin Films Prepared by Spin Spray Method

Hye Ryeong Oh, Yeon-Ju Park, Woo-Sung Lee, Chan-Sei Yoo, Myong-Jae Yoo, and Intae Seo

Electronic Convergence Material & Device Research Center, Korea Electronics Technology Institute, Seongnam 13509, Korea

(Received December 27, 2023; Accepted January 3, 2024)

Abstract: The low-temperature deposition of $\text{BaNi}_{(2-x)}\text{Co}_x\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ thin films with a Ba hexaferrite structure for electromagnetic shielding was studied. The $\text{BaNi}_{(2-x)}\text{Co}_x\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ thin films produced through the spin spray process were suitable for thin film deposition on a flexible substrate because it crystallized well at low temperature below 90°C . The change in shielding characteristics depending on the Co content of the $\text{BaNi}_{(2-x)}\text{Co}_x\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ thin film was investigated, and excellent shielding characteristics with S21 of -1 dB were obtained in a wide frequency range of 26–40 GHz when the Co content was 0.4 or more. The purpose of this study is to analyze changes in shielding properties caused by change in Co content in relation to phase changes in $\text{BaNi}_{(2-x)}\text{Co}_x\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ and obtain basic data for developing excellent flexible electromagnetic wave shielding materials.

Keywords: Spin spray method, EMI shielding, Ba hexaferrite, Flexible thin film, mmWave frequency

1. 서론

미래차의 완전 자율주행에 대한 요구가 지속됨에 따라, 효율적인 자율주행과 도로환경의 안전 확보를 위한 V2X (vehicle to everything) 시스템 구현에 대한 필요성이 대두되고 있다 [1]. 대용량의 정보가 초고속으로 전송되는 V2X 구현을 위해서는 차량 내에 5G 초고주파(밀리미터파) 급의 전장용 통신 모듈이 반드시 탑재되어야 한다. 최근에는 이러한, 전장용 통신 모듈의 차량 내 탑재 수량이 증가

함에 따라, 통신 모듈의 소형화가 필요하게 되었으며, 이에 따라 기존 대비 모듈 내 통신 소자의 높은 집적도가 요구되고 있다 [2]. 그러나 V2X를 위한 초고주파 환경에서는 전자파 간섭(electromagnetic interference, EMI)에 의한 전자소자 간 오작동 및 신호품질 저하의 문제점이 발생하므로, 개별 소자 사이의 간격이 좁은 초고집적 통신 모듈의 품질이 저하되는 문제가 있다 [3]. 따라서 이러한 전자파의 간섭을 최소화할 수 있도록, 개별 소자의 전자파 차폐 기술이 반드시 필요하며, 이를 위해서는 전자파 차폐 소재에 대한 개발이 선행되어야 한다.

금속 및 탄소 계열의 전도성 소재는 높은 자기 전도도 및 자화율을 가지고 있어 전자파를 반사하여 전자파 차폐를 구현한다. 이러한 전도성 소재는 높은 반사 효율을 가지고 있으며, 차폐 효율이 높고 발열이 적다는 장점이 있다 [4].

✉ Intae Seo; itse@keti.re.kr

Copyright ©2024 KIEEME. All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

하지만 무겁고 산화가 잘되며, skin depth (σ)가 매우 작아 전자파의 2차 반사를 발생시키는 문제가 있다 [5]. 이와 대조적으로, 입방정 스피넬 구조를 가지는 자성(ferrite) 세라믹은 높은 전도도를 가지면서도 자기 이력 손실과 자기 스핀 감쇠 진동으로 전자파의 에너지 흡수가 가능하여 2차 반사가 최소화된 전자파 차폐 소재로서 활용이 가능하다 [6]. 하지만 GHz 대역 이상에서 자기 이방성 값이 작아 공진주파수가 투자율에 반비례하는 Snoek의 한계(Snoek's limit)를 넘지 못해 사용 주파수에 제한이 있다 [7].

세라믹 차폐 소재의 한계를 극복하기 위한 다양한 연구가 진행되었다 [8]. 특히, Ba^{2+} 및 Sr^{2+} 이 ferrite에 치환된 hexaferrite 구조는 높은 자기 이방성을 갖고 Snoek의 한계를 넘기 때문에 GHz 대역에서도 차폐 소재로 충분히 사용이 가능함이 보고되었다 [9]. 더 나아가서, hexaferrite에 비자성 및 약한 자기 모멘트를 갖는 2~4가 금속 이온을 일정량 치환함으로써, 사용 주파수 대역을 향상하려는 많은 연구가 진행되고 있다 [10]. 최근에는, 점점 소형화 및 고주파화되는 전자기기에 적용하기 위해, 박막 hexaferrite를 제조하는 방법에 관한 연구가 진행되고 있다 [11]. 일반적으로, 박막 형태로 페라이트계 차폐 소재를 구현할 경우, 실효투자율의 변화가 적어 일반 세라믹 소자에서 구현할 수 없는 큰 효과를 나타낼 수 있음이 보고되었다 [12].

기존 페라이트 박막을 형성하는 CVD, Sputter, Plasma 및 ALD 대비 스피넬 스프레이법은 상대적으로 저온에서 결정질 박막을 제조할 수 있어, 고분자 기판 사용이 가능하다는 장점이 있다 [13]. 고분자 기판 위에 페라이트 결정 박막을 성장시킬 경우, 유연한 차폐 소자가 구현될 수 있으며, 이는 설계의 자유도가 높아 소형화가 가능하고 고밀도 배선을 쉽게 적용할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 본 연구에서는 Co^{2+} 와 Ni^{2+} 가 치환된 Ba계 hexaferrite 박막을 스피넬 스프레이법을 이용해서 고분자 기판 위에 제조하고, hexaferrite 조성 변화에 따른 차폐 특성을 확인함으로써, 차세대 초고주파 유연 차폐 소자로서의 가능성을 검토하고자 하였다.

2. 실험 방법

Ba hexaferrite에 Ni^{2+} 과 Co^{2+} 가 동시에 치환된 $BaNi_{(2-x)}Co_xFe_{16}O_{27}$ 박막을 스피넬 스프레이 증착법을 이용하여 제작하였다. $FeCl_2 \cdot 4H_2O$, $NiCl_2 \cdot 6H_2O$, $CoCl_2 \cdot 6H_2O$, $BaCl_2 \cdot 6H_2O$ (Daejung Chemicals & Metals Co., Ltd., Korea)을 18.2 M Ω ·cm 비저항을 나타내는 증류수에 용해시켜 10분 동안 교반하여 반응 용액을 제작하였다. 두께 125 μ m,

면적 100 cm^2 를 가지는 polyimide film을 0.25 kW에서 15초 동안 플라즈마 처리를 한 후, 90°C의 온도에서 110 rpm의 속도로 회전시킨 기판 위에 질소 가스와 섞인 반응 용액과 산화 용액을 각각 50 ml/min의 속도로 분사하였다. 이때 산화 용액은 sodium nitrite, ammonium acetate, ammonia solution (SAMCHUN Chemical Co., Ltd., Korea, 28.0~30.0%)을 사용하였다.

Polyimide film 위에 제작된 $BaNi_{(2-x)}Co_xFe_{16}O_{27}$ 박막의 구조 분석을 위해 X선 회절분석기(XRD, Smart Lab 9kW, Rigaku)를 이용하였다. 박막의 미세구조와 원소 함량을 각각 전자주사현미경(SEM, Hitachi FE-SEM S-4800)과 EDS (HORIBA EMAX x-stream)를 이용하여 분석하였다.

박막의 투자율은 N1500A (KEYSIGHT) S/W를 통해 spot focusing antenna를 이용한 free space 방식을 이용해 평가하였으며, 차폐 특성은 waveguide 방식을 이용하여 Ka-band (26.5~40 GHz)에서 S-parameter 값을 도출함으로써 측정하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

그림 1은 polyimide 박막 위에 증착된 $BaNi_{(2-x)}Co_xFe_{16}O_{27}$ 박막의 Co 함량에 따른 XRD 패턴을 나타낸 것이다. 모든 조성에서 별도의 열처리 공정 없이도 90°C의 저온에서 결

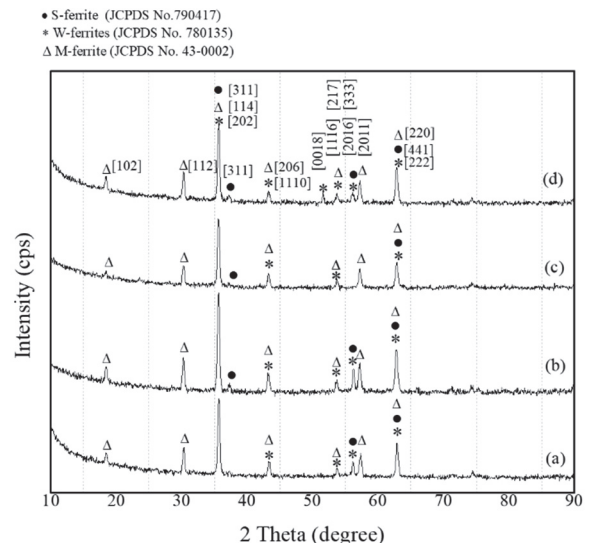


Fig. 1. XRD patterns of $BaNi_{(2-x)}Co_xFe_{16}O_{27}$ ferrite films fabricated by spin spray deposition at 90°C: (a) $x=0.0$, (b) $x=0.2$, (c) $x=0.4$, and (d) $x=0.8$.

정 박막을 얻을 수 있음을 확인하였다. 모든 조성에서 Ba hexaferrite에 해당하는 peak이 관찰되었으나, Co 함량이 증가함에 따라 $(Ni_{(2-x)}Co_x)^{2+}_2Fe_4O_8$ 로 구성된 spinel 구조의 S-type이 성장하는 것을 확인하였다. 일반적으로 2가 전이금속이 치환된 Ba hexaferrite는 W-type hexaferrite이며, $Me^{2+}_2Fe_4O_8$ 의 S-type와 $Ba^{2+}Fe_{12}O_{19}$ 로 이루어진 M-type hexaferrite로 구성된다 (Me^{2+} : 2가 전이금속) [14]. Co 함량이 0.0 mol인 경우에는 대부분의 상이 M-type으로 구성된 W-type hexaferrite로 이루어져 있으나, Co 함량이 증가함에 따라, W-type의 M-type, S-type로의 분리가 일어나며, 점차로 M-type ferrite의 비

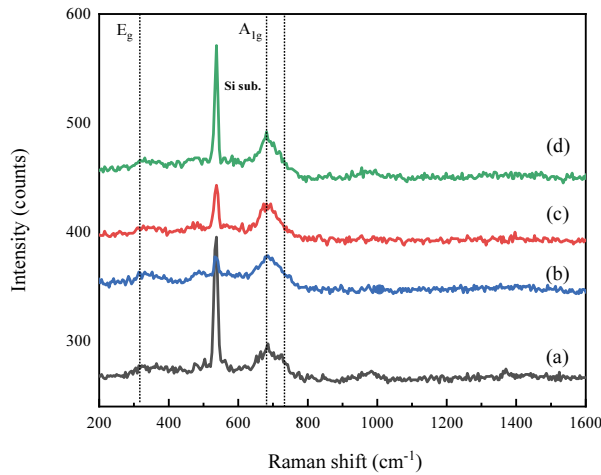


Fig. 2. Raman shift XRD patterns of $BaNi_{(2-x)}Co_xFe_{16}O_{27}$ ferrite films fabricated by spin spray deposition at 90°C: (a) $x=0.0$, (b) $x=0.2$, (c) $x=0.4$, and (d) $x=0.8$.

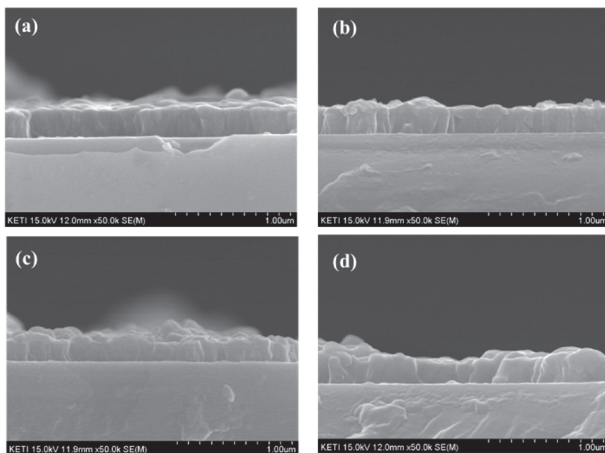


Fig. 3. Fracture SEM images of $BaNi_{(2-x)}Co_xFe_{16}O_{27}$ ferrite films fabricated by spin spray deposition at 90°C: (a) $x=0.0$, (b) $x=0.2$, (c) $x=0.4$, and (d) $x=0.8$.

율이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 0.4 mol의 Co^{2+} 가 치환된 경우, M-type의 급격한 감소에 따른 S-type의 급격한 증가가 일어나며, 이는 스핀 스프레이 공정 중 Co 치환에 따른 Co^{2+} 기반 S-phase 합성 반응이 Ba^{2+} 기반의 M-type 합성 반응보다 먼저 일어나기 때문인 것으로 추측된다.

좀 더 명확한 상 분석을 위해 $BaNi_{(2-x)}Co_xFe_{16}O_{27}$ 박막의 Raman spectrum을 측정하였고 이를 그림 2에 나타냈다. 분석 결과 Co 함량이 0.0 mol인 경우, 720 cm^{-1} 과 684 cm^{-1} 에서 나타나는 A_{1g} peak가 명확하게 보이며, 이는 M-type ferrite와 일치함을 알 수 있다 [15]. 하지만 Co 함량이 증가함에 따라 해당 peak가 사라지고 각각 695 cm^{-1} 과 312 cm^{-1} 에서 나타나는 S-type의 A_{1g} , E_g peak만 남는 것을 확인할 수 있다 [16]. 특히, M-type와 S-type를 구분 짓는 720 cm^{-1} 에서의 Raman peak가 Co 함량이 0.4 mol 이상인 경우에 거의 사라지는 것으로부터 이러한 사실을 더욱 명확히 할 수 있다. 따라서 앞선 XRD 결과와 비교하여 볼 때, Co 함량 증가에 따라 W-type hexaferrite 내 M-type ferrite가 감소하고 S-type ferrite가 증가함을 확인하였다.

그림 3은 $BaNi_{(2-x)}Co_xFe_{16}O_{27}$ 박막의 단면 미세구조를 나타낸 것이다. 90°C에서 증착된 모든 조성에서 약 250 nm의 결정질 박막이 잘 형성되었으며, 기판에 수직인 주상구조(columnar structure)를 가짐을 확인하였다. 일반적으로 스핀 스프레이는 증착 원소가 이온화되어 있는 반응 용액과 산화 용액의 저온 반응으로 결정질 박막이 형성되는 원리이므로 이러한 90°C 이하에서 생성된 저온 결정 구조는 스핀 스프레이 공법을 사용하여 박막을 제조하였기 때문으로 판단된다 [17]. 해당 미세 구조로부터 EDS 분석을 수행하였고 그 결과를 그림 4와 표 1에 각각 나타내었다. Co 함량이 증가함에 따라, 다른 원소의 함량 변화는 없는 반면, 박막 내 Co^{2+} 함량이 증가하고 Ba^{2+} 함량이 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 Co 함량 증가에 따라 스핀 스프레이 공정 중 S-type ferrite 합성이 먼저 일어나 M-type ferrite 합성 반응에 참여하지 못한 Ba^{2+} 이온이 용매에 녹아 나오기 때문으로 생각되며, 이는 앞선 XRD

Table 1. Element contents of $BaNi_{(2-x)}Co_xFe_{16}O_{27}$ ferrite films fabricated by spin spray deposition at 90°C.

	Element (atomic %)			
	Fe	Co	Ni	Ba
$x=0.0$	37.19	0	1.8	0.66
$x=0.2$	40.31	0.77	0.76	0.56
$x=0.4$	34.12	1.71	2.22	0.28
$x=0.8$	34.5	3.24	1.71	0.23

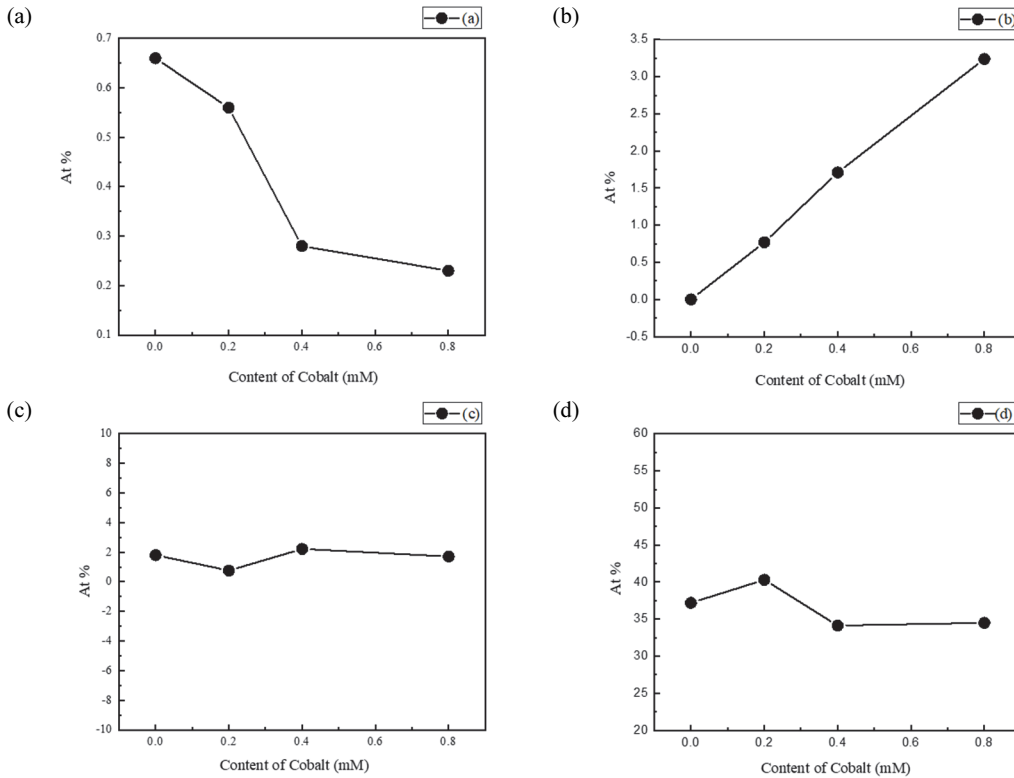


Fig. 4. EDS profiles of $\text{BaNi}_{(2-x)}\text{Co}_x\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ ferrite films fabricated by spin spray deposition at 90°C : (a) Ba, (b) Co, (c) Ni, and (d) Fe.

분석 결과와 일치함을 알 수 있다.

그림 5는 polyimide 기판에 형성된 $\text{BaNi}_{(2-x)}\text{Co}_x\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ 박막의 유연성을 평가한 그림이다. 평가 결과 모든 조성에서 곡률 반경 약 5 mm의 우수한 유연성을 보임을 확인하

였다. 유연성 평가 후 결정 박막의 손상 정도를 확인하기 위해 SEM 분석을 진행하였고 각각의 미세구조를 그림 5에 삽입하여 같이 나타냈다. 미세구조 분석 결과, 유연성 평가 이후에도 결정질 박막 내에 결함이 발생하지 않음을 확인하였다. 이를 바탕으로, 스프인 스프레이 공법으로 제작된 $\text{BaNi}_{(2-x)}\text{Co}_x\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ 박막은 90°C 이하의 저온 결정화가 가능하므로, polyimide 고분자 기판 위에 매우 유연한 hexaferrite 결정 박막을 얻을 수 있었으며, 박막 내 Co 함량 제어를 통해 M-type ferrite와 S-type ferrite의 비율을 조절할 수 있음을 확인하였다.

그림 6(a)는 polyimide 기판에 형성된 $\text{BaNi}_{(2-x)}\text{Co}_x\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ 박막의 복소 투자율(complex permeability)을 실수부와 허수부로 구분하여 나타낸 것이다. 그림 6에서 볼 수 있듯이, 40 GHz 이하의 Ka band에서 평평한 실수부 및 허수부 투자율 곡선을 보임이 확인되었다. 따라서 $\text{BaNi}_{(2-x)}\text{Co}_x\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ 박막의 경우 측정 주파수 범위에서 Snoek's 한계를 야기할 수 있는 공진 주파수가 관측되지 않았으므로, polyimide 기판에 형성된 $\text{BaNi}_{(2-x)}\text{Co}_x\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ 박막은 Snoek's 한계를 극복하여 Ka band 내 초고주파 차폐 특성이 우수할 것으로 예상되며, 이러한 Snoek's 효과의 최소화는 250 nm 이하의 균일한 결정 박막을 형성하였기 때문으로 생각된

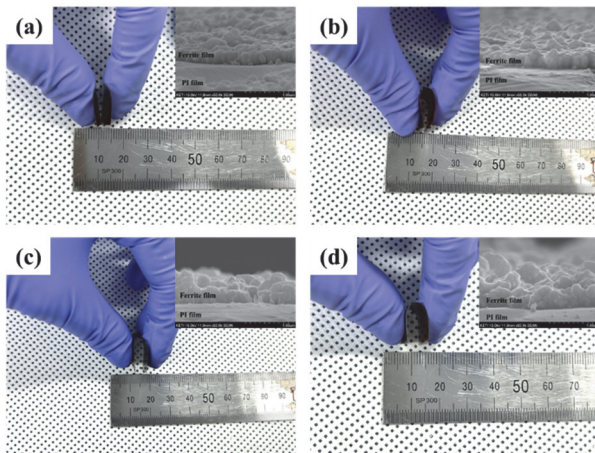


Fig. 5. Bending curvatures and inset SEM images after bending of $\text{BaNi}_{(2-x)}\text{Co}_x\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ ferrite films fabricated by spin spray deposition at 90°C : (a) $x=0.0$, (b) $x=0.2$, (c) $x=0.4$, and (d) $x=0.8$.

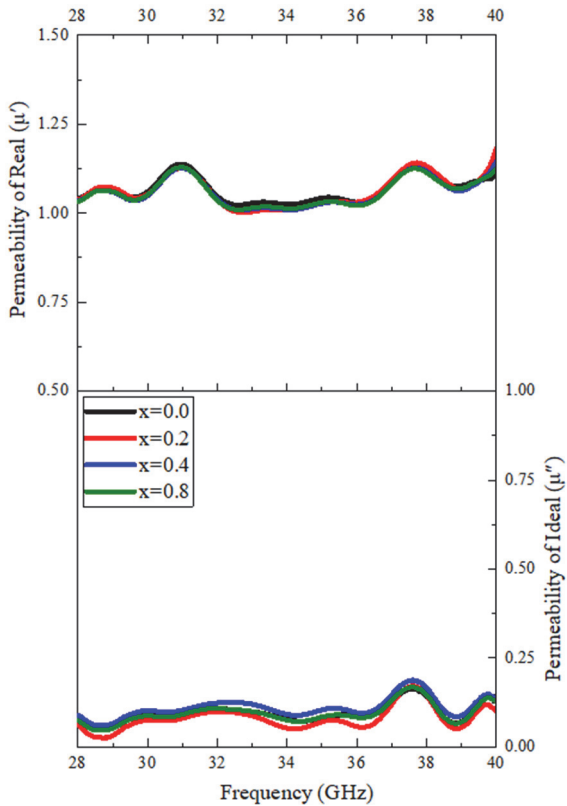


Fig. 6. Complex permeability within Ka band of $\text{BaNi}_{(2-x)}\text{Co}_x\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ ferrite films fabricated by spin spray deposition at 90°C .

다 [18].

그림 7(a)와 (b)는 각각 polyimide 기판에 형성된 $\text{BaNi}_{(2-x)}\text{Co}_x\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ 박막의 투과 특성(S_{21})과 반사 특성(S_{11})을 나타낸 것이다. Co를 치환하지 않은 박막의 경우, 그림 7(a)에서 볼 수 있듯이, 약 -3 dB 이내의 S_{21} parameter를 보여, 높은 차폐 특성을 가진다. 하지만 Co 함량이 증가함에 따라, 약 -1 dB 이내의 S_{21} parameter를 보여 차폐 특성이 감소하였음을 알 수 있다. 이러한 차폐 특성의 감소는 앞선 구조 분석에서 언급하였듯이, Co 함량 증가에 따른 S-type ferrite 분율의 증가 때문으로 판단된다. 일반적으로 S-type ferrite는 전자파를 반사하는 형태로 전자파 차폐를 구현하므로, Co 함량 증가에 따라 $\text{BaNi}_{(2-x)}\text{Co}_x\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ 박막의 반사 차폐 효과가 상승함을 예상할 수 있다. 그림 7(b)에서 볼 수 있듯이 Co 함량이 증가함에 따라, S_{11} parameter가 증가하여 0.4 mol의 Co가 치환된 경우 -10 dB의 매우 높은 반사 특성을 보인다. 중요한 점은, Co가 치환되지 않은 hexaferrite는 Ka band 내에서 매우 높은 주파수 의존성을 보이는 반면, Co 함량이 증가함에 따라 $\text{BaNi}_{(2-x)}\text{Co}_x\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ 박막 차폐 특성의 주파수 의존성이 급격하게 감소한다는 것이다. 이러한 주파수 의존성 감소는 Ba hexaferrite 박막 내 혼합상의 존재 때문으로 추측된다. 일반적으로 전자파 흡수를 통한 차폐는 소재의 표면에서 전자파를 흡수하여 내부의 열로 변화하는 거동으로서, 발열에 취약하고, 주파수 의존성이 크다는 단점이 있다. 반

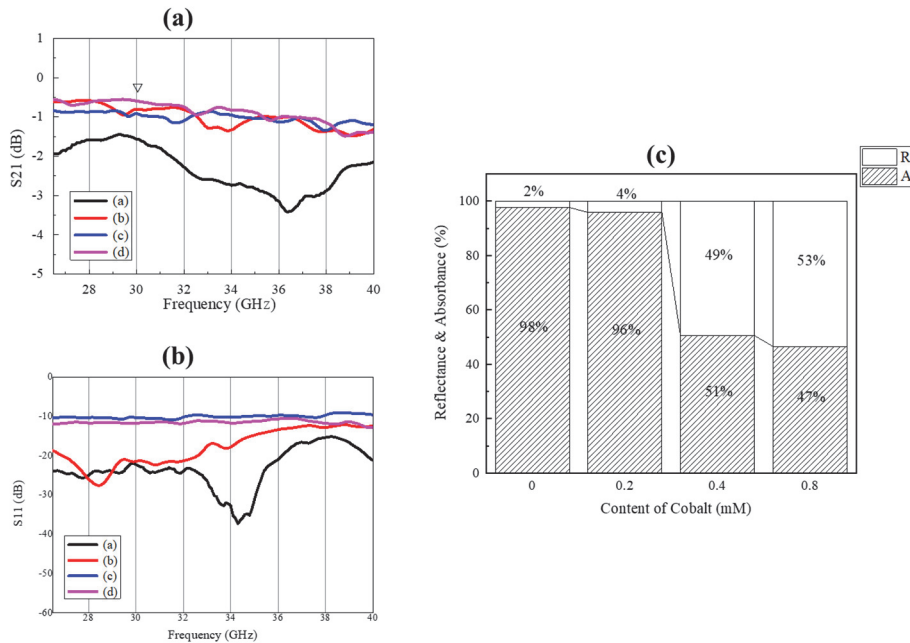


Fig. 7. (a) S_{21} , (b) S_{11} parameters, and (c) Ratios between reflect and absorption within Ka band of $\text{BaNi}_{(2-x)}\text{Co}_x\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ ferrite films fabricated by spin spray deposition at 90°C .

면에 전자파 반사를 통한 차폐는 소재의 표면에서 전자파를 반사하는 거동으로써 주파수 의존성이 매우 낮다는 장점이 있다. 따라서 고주파수 대역에서 넓은 주파수 범위의 안정적인 차폐 특성 구현을 위해서는 차폐 시 적절한 흡수와 반사 분율이 유지되어야 한다. 앞선 구조 분석에서 논의되었듯이, 스피ن 스프레이 공법으로 polyimide 기판에 형성된 $\text{BaNi}_{(2-x)}\text{Co}_x\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ 박막은 Co 함량 증가에 따라 흡수 차폐 성능을 보이는 M-type ferrite 분율이 감소하고, 반사 차폐 성능을 보이는 S-type ferrite 분율이 증가한다. 결과적으로, 스피ن 스프레이 공정 중에 Co 함량 제어를 통해 흡수 성능과 차폐 성능의 분율을 제어할 수 있었고, 이로부터 Ka band 내에서 주파수 의존성이 최소화된 우수한 차폐 특성을 얻을 수 있었다.

실제 $\text{BaNi}_{(2-x)}\text{Co}_x\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ 박막의 차폐 성능 내 흡수 및 반사 비율을 아래 식으로부터 계산하여 그림 7(c)에 나타내었다 [19]. S_{11} 과 S_{21} 은 산란 매개 변수이며, SER, SEA 및 SET는 반사, 흡수 및 전체의 차폐 효과를 나타낸다. R, A, T는 각각 반사율, 흡광도, 투과율을 나타낸다.

$$R = |S_{11}|^2 \quad (1)$$

$$T = |S_{21}|^2 \quad (2)$$

$$A = 1 - R - T \quad (3)$$

$$SER = -10 \log(1 - R) \quad (4)$$

$$SEA = -10 \log\left(\frac{T}{1-R}\right) \quad (5)$$

$$SET = SER + SEA \quad (6)$$

$$R(\%) = \left(1 - 10^{-\frac{SER}{10}}\right) \times 100 \quad (7)$$

$$A(\%) = \left(1 - 10^{-\frac{SER}{10}}\right) \times (100 - R) \quad (8)$$

Co 함량이 증가함에 따라 전체 차폐 성능에서 반사 특성이 차지하는 비율이 증가하며, 0.4 mol 이상의 Co가 치환된 경우, 반사특성이 급격하게 증가함을 확인하였다. 0.4 mol의 Co가 치환된 $\text{BaNi}_{1.6}\text{Co}_{0.4}\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ 박막의 전체 차폐 성능에서 반사와 흡수의 비율은 약 49:51로 나타났으며, 이는 스피ن 스프레이 공정 내에서 Co 함량의 제어로 S-type ferrite와 M-type ferrite의 비율을 변화시켰기 때문으로 생각된다.

4. 결론

스핀 스프레이 공법으로 제조된 hexaferrite 구조의 $\text{BaNi}_{(2-x)}\text{Co}_x\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ 박막은 90°C의 저온에서도 결정화가 가능하여 polyimide 고분자 기판 위에 손쉽게 결정질 박막을 구현할 수 있었다. $\text{BaNi}_{(2-x)}\text{Co}_x\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ 박막은 bending test 결과 약 5 mm의 매우 작은 곡률 반경을 가지며, test 이후에 미세구조상 결함이 관측되지 않으므로, 스피ن 스프레이 공법을 이용하여 매우 유연한 hexaferrite 구조의 결정질 박막을 얻을 수 있음이 확인되었다. 다양한 분석을 통해, Co 함량 변화에 따라 박막 내 ferrite type별 비율 제어가 가능함을 확인하였다. $\text{BaNi}_{(2-x)}\text{Co}_x\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ 박막은 W-type ferrite이며, Co가 첨가되지 않은 경우에는 M-type ferrite의 비율이 매우 높고, Co 함량이 증가함에 따라 M-type ferrite 비율의 감소와 S-type ferrite 비율의 증가가 동시에 나타났다. 이러한 M-type 및 S-type ferrite는 전자파 차폐 특성을 구현하는 데 있어 각각 흡수 거동과 반사 거동을 보이므로 $\text{BaNi}_{(2-x)}\text{Co}_x\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ 박막 내 Co 함량 제어를 통해 전체 차폐 특성 내에서 흡수와 반사 비율을 제어할 수 있었다. 0.4 mol의 Co가 치환된 $\text{BaNi}_{1.6}\text{Co}_{0.4}\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ 박막은 전자파 흡수와 반사의 비율이 약 51:49로 나타났으며, Co가 치환되지 않은 기존 조성 대비 반사 비율의 증가로, Ka band 내 주파수 의존성이 매우 작은 우수한 차폐 특성을 나타냈다.

ORCID

Intae Seo

<https://orcid.org/0000-0002-6447-8113>

감사의 글

This research was supported by Material & Device Packaging Program through the Korea Evaluation Institute of industrial technology (KEIT) funded by Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE) (1415186006).

REFERENCES

- [1] A. Papatthassiou and A. Khoryaev, *Cellular V2X as the Essential Enabler of Superior Global Connected Transportation Services*, <https://futurenetworks.ieee.org/tech-focus/june-2017/cellular-v2x> (2017).

- [2] S. Ghosh, I. Calizo, D. Teweldebrhan, E. P. Pokatilov, D. L. Nika, A. A. Balandin, W. Bao, F. Miao, and C. N. Lau, *Appl. Phys. Lett.*, **92**, 151911 (2008).
doi: <https://doi.org/10.1063/1.2907977>
- [3] M. Sandström, K. H. Mild, M. Sandström, and A. Berglund, *Behav. Inf. Technol.*, **12**, 359 (1993).
doi: <https://doi.org/10.1080/01449299308924400>
- [4] S. E. Lee, D. Kim, M. Y. Lee, M. K. Lee, E. Jeong, and Y. S. Lee, *Polymer Korea*, **39**, 114 (2015).
doi: <https://doi.org/10.7317/pk.2015.39.1.114>
- [5] R. Ram, D. Khastgir, and M. Rahaman, *Polym. Int.*, **68**, 1194 (2019).
doi: <https://doi.org/10.1002/pi.5812>
- [6] X. Chen, X. Wang, L. Li, and S. Qi, *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, **27**, 10045 (2016).
doi: <https://doi.org/10.1007/s10854-016-5076-2>
- [7] D. H. Lee, C. Y. Kwon, and K. S. Moon, *J. Kor. Cryst. Growth Cryst. Technol.*, **31**, 197 (2021).
doi: <https://doi.org/10.6111/JKCGCT.2021.31.5.197>
- [8] S. Ann and K. J. Kwon, *J. Inst. Electron. Inf. Eng.*, **56**, 93 (2019).
doi: <https://doi.org/10.5573/ieie.2019.56.10.93>
- [9] T. Nakamura and E. Hankui, *J. Magn. Magn. Mater.*, **257**, 158 (2003).
doi: [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(02\)00114-2](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(02)00114-2)
- [10] N. Tran, T. L. Phan, N. T. Dang, D. S. Yang, and B. W. Lee, *J. Phys. Chem. Solids*, **131**, 55 (2019).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2019.03.015>
- [11] J. J. Xu, C. M. Yang, H. F. Zou, Y. H. Song, G. M. Gao, B. C. An, and S. C. Gan, *J. Magn. Magn. Mater.*, **321**, 3231 (2009).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2009.05.039>
- [12] K. H. Shin, *J. Korean Magn. Soc.*, **25**, 22 (2015).
doi: <https://doi.org/10.4283/JKMS.2015.25.1.022>
- [13] Q. Zhang, T. Itoh, M. Abe, and Y. Tamaura, *J. Appl. Phys.*, **73**, 6284 (1993).
doi: <https://doi.org/10.1063/1.352671>
- [14] L. Wang, J. Song, Q. Zhang, X. Huang, and N. Xu, *J. Alloys Compd.*, **481**, 863 (2009).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.03.136>
- [15] J. Kreisel, G. Lucazeau, and H. Vincent, *J. Solid State Chem.*, **137**, 127 (1998).
doi: <https://doi.org/10.1006/jssc.1997.7737>
- [16] S. Anand, S. Pauline, V. M. Vinosel, and M. A. Janifer, *Mater. Today: Proc.*, **8**, 476 (2019).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.02.141>
- [17] M. Abe and Y. Tamaura, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **22**, L511 (1983).
doi: <https://doi.org/10.1143/JJAP.22.L511>
- [18] T. Nakamura, *J. Appl. Phys.*, **88**, 348 (2000).
doi: <https://doi.org/10.1063/1.373666>
- [19] A. M. Nicolson and G. F. Ross, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **19**, 377 (1970).
doi: <https://doi.org/10.1109/TIM.1970.4313932>