

주파수 선택 표면이 부착된 카보닐 철 분말 복합재의 전파흡수특성

조한신 · 김성수*

충북대학교 신소재공학과

Microwave Absorbing Properties of Carbonyl Iron Particle Composites with Frequency Selective Surface

Han-Shin Cho and Sung-Soo Kim*

Department of Advanced Materials Engineering,
Chungbuk National University, Cheongju 28644, Republic of Korea

Abstract: With the increased use of diverse electronics in the high frequency spectrum, high-performance absorbing and shielding materials are needed to ensure electromagnetic compatibility. Microwave absorbance of polymer composites of carbonyl iron powders with frequency selective surface (FSS) is investigated, focusing on the frequency of 5.8 GHz. Composite sheets were prepared by hot pressing a mixture of carbonyl iron powders and silicone rubber. FSS with a square-loop geometry and surface resistance close to the optimum value was fabricated by a screen printing method using carbon black paste as conductive ink. The microwave absorbance for both normal and oblique incidence angles was determined using the commercial computational tool (ANSYS-HFSS). The particulate composites show a reflection loss of -21 dB at 5.8 GHz, with a small thickness of 2.5 mm. Further enhancement of microwave absorbance (less than -40 dB reflection loss) can be realized by attaching a resistive square-loop FSS on the grounded magnetic composite, which is attributed to the enhanced impedance matching driven by the additional resistive component of the attached FSS. The experimental results, obtained with a test sample of optimized composite structure with FSS, are in good agreement with the simulation results. In addition, it was found that the angular stability of the carbonyl iron absorber improved by attachment of FSS, particularly for TM polarization.

(Received June 20, 2019; Accepted September 4, 2019)

Keywords: carbonyl iron, microwave absorbers, frequency selective surfaces

1. 서 론

최근 정보통신수단의 발달로 스마트 폰, 무선 인터넷, 자동요금징수시스템, 드론, 사물인터넷 (IoT) 등, 우리 생활 주변에 전자파를 활용하는 제품들이 증가되고 있고, 향후 5G (IMT-2020), 자율주행차량, 차량용 인포테인먼트 등이 상용화될 경우 전자파를 활용하는 제품들은 급격하게 증가하게 될 것이다 [1]. 대용량 콘텐츠를 보다 빠른 속도로 전송하고, 접속 용량 및 횡수를 배가시키기 위해서는 사용

하는 주파수 대역의 고주파화가 요구된다. 이를 만족시킬 수 있는 주파수 대역이 5.8 GHz 부근으로 상업적으로 매우 중요한 주파수 대역이다. 구체적으로 무선 LAN의 동작주파수는 5.8 GHz, 드론의 원격조종 주파수는 5.0-5.9 GHz, 근거리 IoT의 통신주파수는 5.6-5.8 GHz, 지능형 교통시스템 (ITS)의 DSRC 주파수는 5.8 GHz를 사용한다 (표 1). 이러한 무선기술을 이용하는 정보통신 기기의 발달은 각종 전자기기 및 계측기기의 오작동 등과 같은 전자파 장애 (Electro-Magnetic Interference : EMI) 문제를 유발하며, 소형화, 고속화, 다기능화를 지향하는 현대 정보통신 산업에 있어서 치명적인 장애요소로 대두되고 있다. 특히 각종 정보통신기기의 동작주파수가 밀집되어 있는 5.8 GHz 대역에서 EMI 문제는 매우 심각하다.

- 조한신: 박사과정, 김성수: 교수

*Corresponding Author: Sung-Soo Kim

[Tel: +82-43-261-2418, E-mail: sskim@cbnu.ac.kr]

Copyright © The Korean Institute of Metals and Materials

Table 1. Various electronic and wireless application using 5.8 GHz operating frequency.

Application	Operating Frequency (GHz)
Wireless LAN	5.8, 2.45
Drone	5.0-5.9
Short Range IoT	5.6-5.8
DSRC (ITS)	5.8

이러한 전자파 간섭 문제를 감소 또는 억제시키기 위한 방법의 하나로 전자파의 발생원 또는 수신기기 주위에 전자파 차폐/흡수가 가능한 재료를 부착시키는 방법을 사용한다. 전자파 흡수체로 사용되는 주된 소재는 페라이트 또는 철계 금속과 같은 연자성 재료이다 [2-10]. 이 중에서 전자파 흡수체로 페라이트 자성체를 사용하는 이유는 높은 자기손실 특성에 근거하고, 재료의 화학조성을 변화시켜 사용 주파수 대역을 제어할 수 있기 때문이다. 일반적으로 스피넬계 페라이트는 1 GHz 미만의 대역에서 대부분 자연공명 주파수가 나타나 0.5~2.5 GHz 대역에서 -10 dB 이하의 양호한 전파흡수 특성을 나타내지만, 그 이상의 영역에서는 흡수특성이 현저히 저하하고, 두께가 5 mm 이상으로 두꺼워지는 단점이 있다.

전자파 흡수용 연자성 금속은 카보닐 철 (carbonyl iron) 이 가장 대표적이다. 카보닐 철 분말은 1925년 미국 BASF 사가 개발한 직경 1~10 μm 크기의 고순도 구형 입자의 연자성 소재이다. 카보닐 철은 순도가 높은 iron pentacarbonyl ($\text{Fe}(\text{CO})_5$)의 화학적 분해로 제조된 고순도 철로서 일반적으로 구형 미세입자로 회색 분말의 외관을 보인다. 전자 제품에서 카보닐 철은 고주파 코일 용 자기 코어에 사용되고, 50 kHz~200 MHz 대역에서 탁월한 품질 계수와 함께 우수한 온도 및 자기 안정성을 보인다. 카보닐 철로 제조된 구형 입자는 스텔스 기능을 갖는 함정 등 군사용 전자파 흡수체의 주요 소재로 사용된다 [11,12]. 최근 Qiao 등 [13]과 Wang 등 [14]은 보다 얇고 성능이 높은 전자파 흡수체 제작을 위해 카보닐 철 구형 분말을 판상으로 가공한 후, 복합재 시편을 제작하여 자연공명주파수를 제어하는 방법에 대한 연구를 진행하였다. Qing 등 [15]은 판상형 카보닐 철 분말에 나노크기의 그래핀 첨가량을 조절한 복합재 시편을 제작하여 보다 얇은 두께이면서도 넓은 대역의 흡수주파수 제어가 가능함을 보고하였다.

본 연구의 목적은 카보닐 철 분말을 포함하는 자기손실 복합재를 기반으로 상업적으로 중요한 5.8 GHz 대역의 전자파 흡수체를 설계, 제작하는 것이다. 자기손실 복합재의 전파흡수특성을 개선하는 방법으로, 복합재 위에 주파수 선

택 표면 (frequency selective surface (FSS))의 부착 효과를 5.8 GHz 대역에 초점을 맞추어 조사하였다. FSS는 patch, cross, ring (사각, 원형)과 같은 특정 패턴의 도체를 유전체 기판 위에 주기적으로 배열시킨 표면을 의미한다 [16,17]. FSS는 외부 전계에 의한 전류 흐름에 의해 저항 및 인덕턴스 성분을 가지며, 도체 사이의 간격에 의해 커패시턴스가 형성된다. 이들 성분의 조절에 의해 전파 반사/투과 특성을 제어할 수 있고, 특정 주파수에서 공진 현상을 보인다 [18-22]. 배면이 도체로 단락된 카보닐 철 분말 복합재 기판 위에 사각 루프 (square loop) 형상의 FSS 도체 패턴을 배열시킨 복합구조의 전파흡수체를 구성한다. 복합재의 자기손실과 FSS의 도체 저항을 연관시켜 임피던스 정합을 유도하고, 5.8 GHz 대역에 초점을 맞추어 무반사 흡수체를 설계한다. 최종적으로 자유공간법에 의한 실측을 통하여 제안한 설계 방법의 타당성을 검증한다.

2. 실험방법

BASF 사의 카보닐 철 분말과 지지재로 RTV (room temperature vulcanization) 실리콘 고무를 사용하여 복합재를 제조하였다. 분말과 고무의 무게비율을 4:1로 하여 twin roller에서 균일하게 혼합한 후, 3 mm 두께의 sheet를 성형하였다. 성형된 sheet를 hot press에서 50 kgf/cm² 압력으로 가압하여 2.5 mm 두께, 500 mm × 500 mm 크기의 평판형 sheet를 제작하였다. 가압 온도는 120 °C, 가압 시간은 20 min이었다.

복합재 시편의 전자파 감쇠능 및 반사손실을 시뮬레이션하기 위해서는 주파수에 따른 재료 고유의 복소투자율 및 복소유전율에 대한 데이터가 필요한데, 이를 반사/투과법에 의해 측정하였다. S 파라미터 (반사계수 (S_{11})와 투과계수 (S_{21}))를 회로망 분석기로 측정하고, 이로부터 재료정수를 계산하였다. 이 재료정수 값을 이용하여 Ansoft 사의 HFSS (High Frequency Structure Simulator) 전자기 해석 툴을 이용하여 다양한 구조 및 조건에서의 반사손실을 시뮬레이션 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 카보닐 철 분말 복합재의 재료정수

그림 1은 카보닐 철 분말 함량이 80 wt%인 고무 복합재 시편의 재료정수를 보여준다. 유전율 실수항 (ϵ_r')값은 10~11 범위의 일정한 값을 보이며, 유전율 허수항 (ϵ_r'')값은 거의 0에 가까운 값을 보인다. 투자율 실수항 (μ_r')은

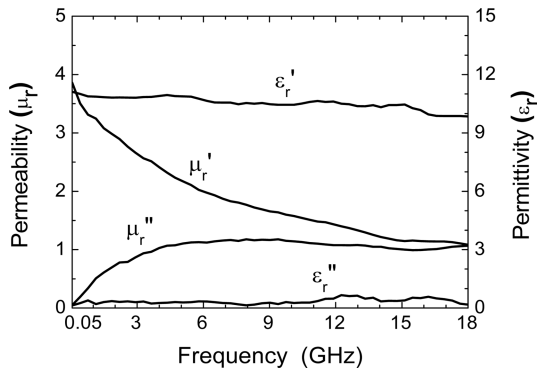


Fig. 1. Complex permeability and permittivity of composite specimen containing carbonyl iron particles (80 wt%).

주파수 증가에 따라 3.8에서 1.1까지 지속적으로 감소하는 값을 나타내고, 투자율 허수항 (μ_r'')은 주파수에 따라 크게 증가하여 6 GHz 이상에서 약 1.2의 일정한 값을 보인다. 이에 따라, 자기손실계수 ($\tan\delta_\mu$)는 1 GHz 미만의 주파수 대역에서 0.1 미만으로 작은 값을 보이고, 점차 증가하여 18 GHz 근처에서 최대 1.0의 값을 보인다.

3.2. 카보닐 철 분말 복합재의 반사손실

그림 2는 배면을 단락시킨 카보닐 철 분말 복합체 시편의 두께 (2~4 mm) 변화에 따른 반사손실 시뮬레이션 결과이다. 4 mm 두께에서는 3.5 GHz에서 -13 dB 수준의 반사손실을 보이며, 2 mm 두께에서는 8.4 GHz에서 -40 dB의 반사손실을 보인다. 이로부터 임피던스 정합이 일어나는 정합두께는 2 mm, 정합주파수는 8.4 GHz임을 알 수 있다. 두께를 2.5 mm로 조절하였을 때, 목표 주파수인 5.8 GHz 대역에서 -21 dB의 반사손실을 보이나, 임피던스 정합에 의한 완전 무반사 흡수체를 얻기 위해서는 FSS의 사용이 요구된다.

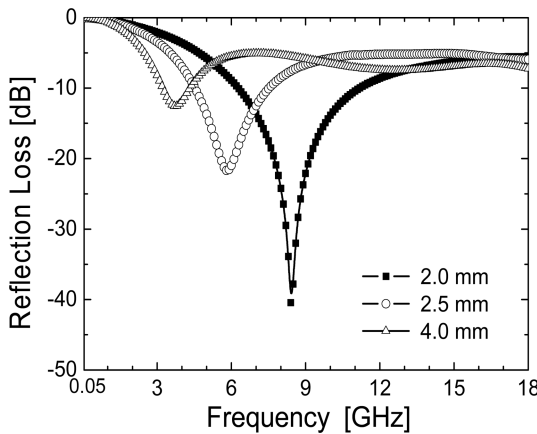


Fig. 2. Reflection loss determined in the carbonyl iron powder composites with increasing the thickness.

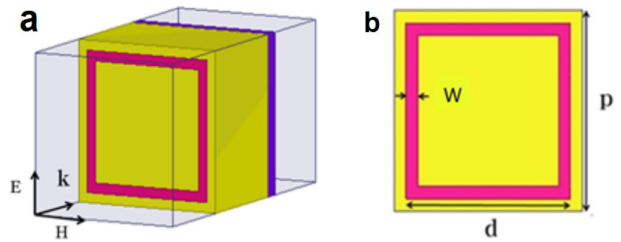


Fig. 3. Schematic description of (a) square-loop FSS (SL-FSS) absorbers with a grounded substrate of carbonyl iron powder composites and (b) dimension of SL-FSS ($p = 10$ mm, $d = 8$ mm, $w = 0.5$ mm).

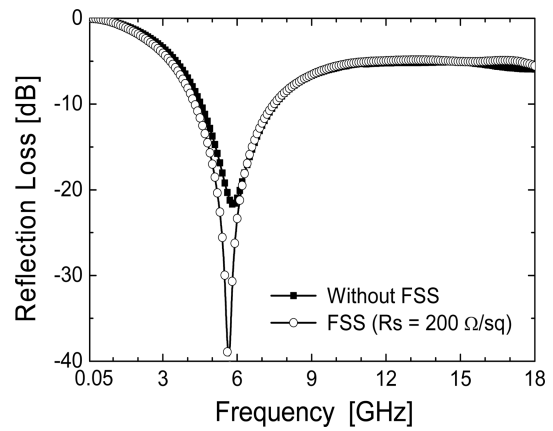


Fig. 4. FSS effect on reflection loss for carbonyl iron powder composites with 2.5 mm thickness.

3.3. FSS 부착 효과

그림 3은 배면을 도체로 단락시킨 카보닐 철 분말 복합재 위에 square-loop FSS (SL-FSS)를 부착시킨 전파흡수체의 단위 셀 구조도이다. 단위 cell의 크기는 $p = 10$ mm이며, SL-FSS 도체의 길이 $d = 8$ mm, 폭 $w = 0.5$ mm, 두께 $t_{FSS} = 0.02$ mm이다. 그림 4는 2.5 mm 두께의 복합재에 FSS 부착 전, 후의 반사손실을 비교한 것이다. FSS 부착 전에 5.8 GHz에서 -21 dB의 반사손실 값으로부터 면저항 $R_s = 200 \Omega/sq$ 의 FSS 부착 후에는 반사손실이 -40 dB로 크게 감소하여 FSS의 부착 효과가 뚜렷함을 볼 수 있다.

3.4. 어드미턴스 분석

단락된 자기손실 복합재와 FSS가 조합된 전파흡수체의 등가회로는 그림 5와 같이 표시된다. 흡수체 표면에서의 어드미턴스는 자기손실 복합재의 어드미턴스와 FSS 어드미턴스의 합으로 표시된다. 두께 t 를 가지는 자기손실 복합재의 배면을 금속으로 단락시켰을 때, 기관 표면에서의 입력 어드미턴스 (Y_i)는 식 (1)과 같다.

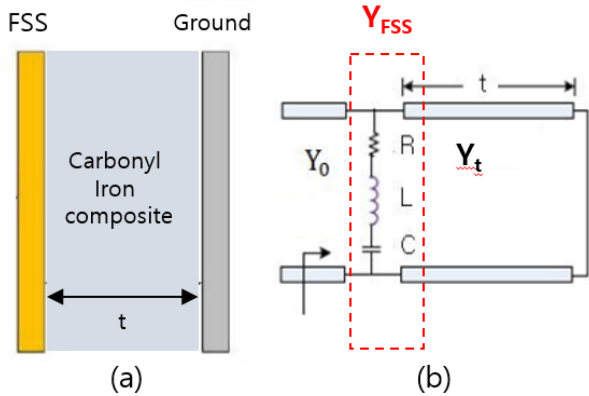


Fig. 5. Schematic of (a) carbonyl iron composite absorber (thickness t) with FSS and (b) equivalent circuit.

$$Y_t = -Y_0 \sqrt{\frac{\epsilon_r}{\mu_r}} \coth\left(j\frac{\omega t}{c} \sqrt{\epsilon_r \mu_r}\right) = Y_0 [Re(Y_t) + jIm(Y_t)] \quad (1)$$

여기서 Y_0 는 공기의 어드미턴스 ($= 1/377 \Omega^{-1}$)이다. ϵ_r 과 μ_r 는 자기손실 복합재의 유전율과 투자율, ω 는 각주파수, c 는 광속이다.

FSS의 어드미턴스 (Y_{FSS})는 식 (2)와 같이 R-L-C 직렬 회로의 합성 식으로 표현된다. 여기서 R, L, C는 각각 FSS의 저항, 인덕턴스, 커패시턴스 성분이다.

$$Y_{FSS} = \frac{1}{R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)} = Y_0 [Re(Y_{FSS}) + jIm(Y_{FSS})] \quad (2)$$

자기손실 복합재의 어드미턴스 Y_t 와 FSS의 어드미턴스 Y_{FSS} 를 병렬합성하면 전체 어드미턴스 Y_{Total} 은 식 (3)과 같이 표시된다.

$$Y_{Total} = Y_t + Y_{FSS} = Y_0 [Re(Y_{Total}) + jIm(Y_{Total})] \quad (3)$$

이러한 구조에서 어드미턴스 정합 조건은 다음과 같다.

$$Re(Y_{Total}) = 1 \quad (4)$$

$$Im(Y_{Total}) = 0 \quad (5)$$

합성 어드미턴스의 허수부는 0이 되어야 하고, 실수부는 공기의 어드미턴스 Y_0 ($= 1/377 \Omega^{-1}$)와 같아야 한다.

카보닐 철 분말 복합재를 기판으로 사용한 경우에 FSS 부착에 따른 전파흡수능의 개선을 어드미턴스 분석을 통하여 분석하였다. 그림 6은 FSS 부착 전, 후에 자유공간의 어드미턴스 (Y_0)로 규격화시킨 합성 어드미턴스 (Y) 분석 결과를 보여준다. 카보닐 철 분말 복합재의 경우 (그림

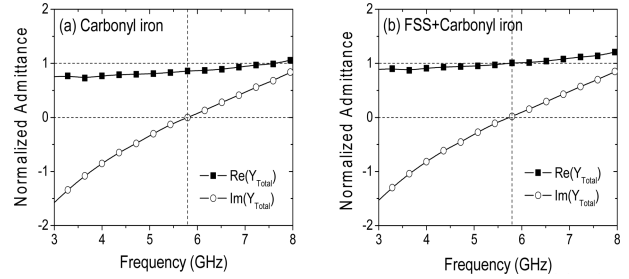


Fig. 6. Normalized admittance analysis in carbonyl iron powder composites with 2.5 mm thickness: (a) without FSS and (b) with FSS ($R_s = 200 \Omega/\text{sq}$).

6(a)), 허수부는 5.8 GHz까지 음의 값 (인덕턴스 성분)을 갖고, 5.8 GHz 이상에서는 양의 값 (커패시턴스 성분)을 나타내고 있다. 실수부는 5.8 GHz에서 0.9의 값으로 어드미턴스 정합 조건에 다소 부족하다. 이 자기손실 복합재에 $R_s = 200 \Omega/\text{sq}$ 인 FSS를 부착한 경우 (그림 6(b)), FSS 저항 첨가 효과에 의해 합성 어드미턴스 실수항이 1에 근접하게 되고, 이로 인해 5.8 GHz에서 -40 dB의 매우 작은 반사손실 값을 얻을 수 있었다.

3.5. FSS 제작 및 전파흡수능 실측

그림 3(b)의 치수를 가지는 SL-FSS를 스크린 인쇄 방법으로 제작하였다. Carbon black이 polyester 바인더 수지에 분산되어 있는 전도성 paste를 사용하였다. 750 mm × 750 mm 크기의 프레임에 STS 200 mesh의 망사를 이용하여 30 μm 의 유제막을 입힌 마스크 패턴을 제작한다. Paste의 면저항 (R_s)은 회로 저항과 도막 두께를 고려하여 200 Ω/sq 를 선택하였다. 인쇄 시 사용한 기판은 0.2 mm 두께의 FR4이다. 이 기판 위에 마스크 패턴을 고정시키고 마스크 패턴에 전도성 paste를 바른 후 스쿼즈를 이동시켜 인쇄한다. 이후 전도성 paste에 혼합되어 있는 용제를 제거하기 위해 130 $^{\circ}\text{C}$ 에서 10 분간 열풍 건조를 한다. 인쇄 후 도막의 평균 두께는 $t_{FSS} = 0.02 \text{ mm}$ 이었다. 이를 2.5 mm 두께의 카보닐 철 분말 복합재에 부착하여 측정 시편을 제작하였다. 측정 시편의 크기는 500 mm × 500 mm이고, 그림 7(a)에 시편의 외관을 나타내었다.

본 연구에서 사용된 반사손실 측정방법은 자유공간법 (free space measurement method)으로 그림 7(b)에 나타내었다. 측정장비는 Agilent E8364B PNA network analyzer, 혼 안테나는 ETS-LINDGREN 3117 model이었다. 측정 주파수 대역은 1~18 GHz이었다. 먼저 두 개의 혼 안테나 전면에 완전 반사체로 구리 판을 설치하고, 반사계수 (S_{11}) 기준값을 측정한다. 구리 판 위에 제작한 시

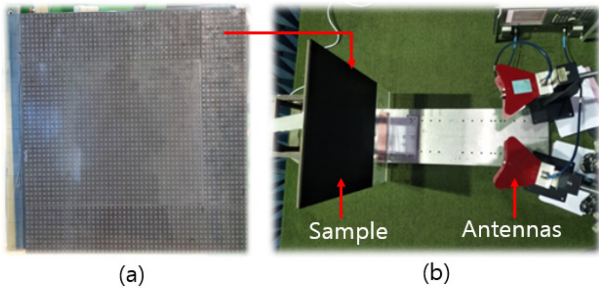


Fig. 7. Free space measurement for reflection loss of carbonyl iron powder composite absorber with SL-FSS; (a) test specimen and (b) measurement set-up.

편을 위치시킨 후, 다시 S_{11} 을 측정하여 반사손실 측정값을 얻는다. 측정값에서 기준값을 빼면 시편에서 흡수된 반사손실 값을 얻을 수 있다.

그림 8은 카보닐 철 분말 복합재 (두께 = 2.5 mm) 표면에 $R_s = 200 \Omega/\text{sq}$ 인 SL-FSS를 부착한 시편에서 측정 한 반사손실 결과이다. 5.8 GHz에서 -24 dB의 반사손실을 보이고, 시뮬레이션 결과와도 비교적 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 스크린 프린팅으로 제작한 FSS 흡수체의 실측결과가 시뮬레이션 결과와 잘 일치함은 기 발표 논문 [22,23]에서도 확인할 수 있다.

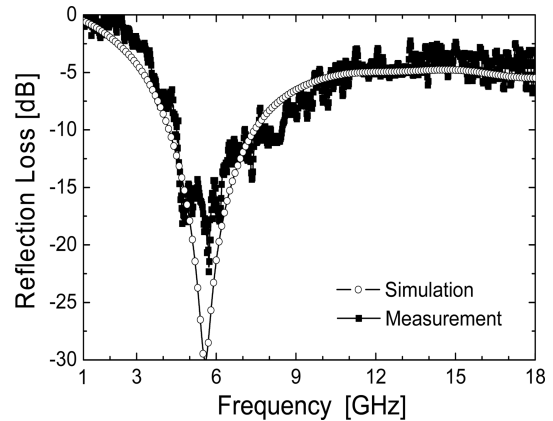


Fig. 8. Measurement result of reflection loss for the grounded carbonyl iron powder composite (thickness = 2.5 mm) with SL-FSS ($R_s = 200 \Omega/\text{sq}$).

3.6. 경사입사 특성

카보닐 철 분말 복합재 (두께 = 2.5 mm)에 SL-FSS ($R_s = 200 \Omega/\text{sq}$)를 부착시킨 시편에서 입사각 $0 \sim 60^\circ$ 범위에서의 경사입사 특성을 분석하였다. 그림 9는 FSS 부착 전, 후의 transverse electric (TE), transverse magnetic (TM) 편파에서 시뮬레이션 한 경사입사 특성 결과이다. 입사각이 증가함에 따라 흡수 주파수 대역의 변화는 크게 없

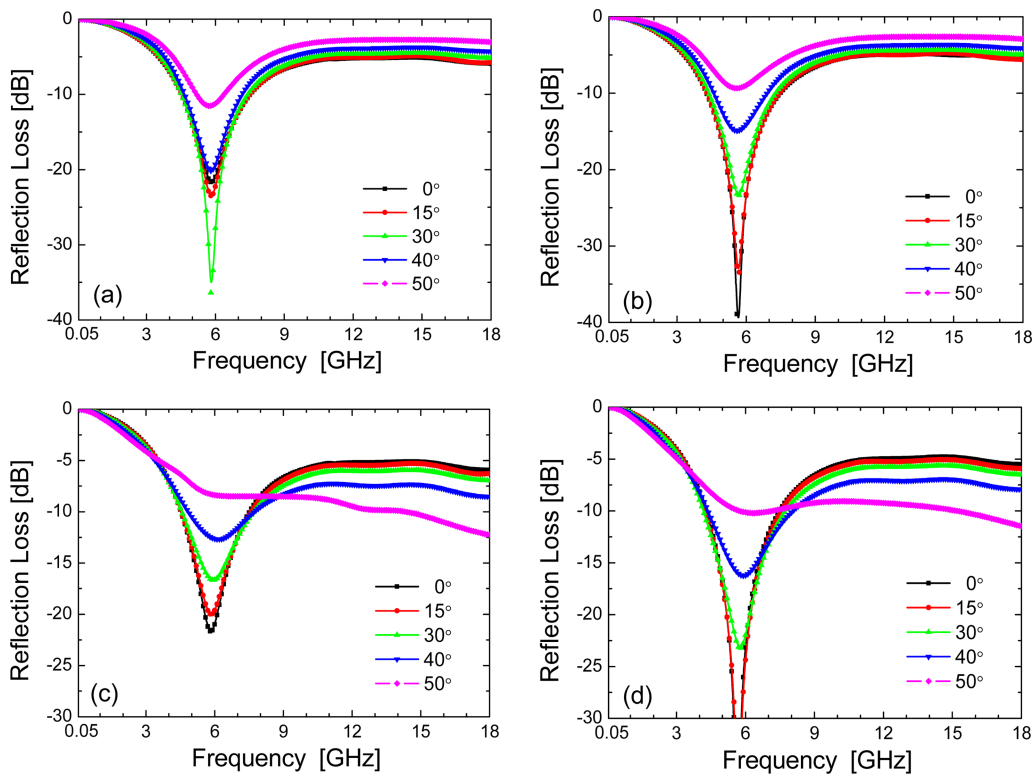


Fig. 9. Reflection loss of carbonyl iron powder composites with SL-FSS with increasing the oblique incidence angles ; (a) without FSS (TE), (b) with FSS (TE), (c) without FSS (TM), and (d) with FSS (TM).

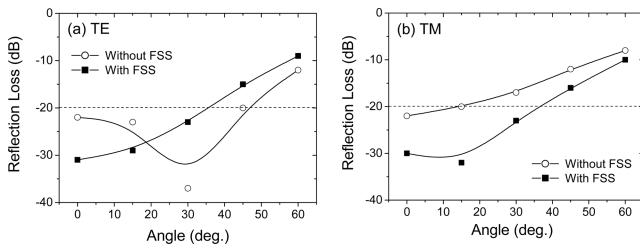


Fig. 10. Reflection loss at 5.8 GHz for carbonyl iron powder composites with SL-FSS with increasing the oblique incidence angles: (a) TE and (b) TM polarization.

다. TE 편파의 경우, FSS를 부착했을 때 20 dB 흡수율 기준 입사각의 범위는 부착 전의 45°로부터 35°로 감소함을 볼 수 있다 (그림 10(a)). 반면, TM 편파의 경우, FSS를 부착함으로써 20 dB 흡수율 기준 입사각의 범위가 부착 전의 15°로부터 40°로 크게 증가함을 볼 수 있다 (그림 10(b)). TE, TM 편파 모두 35°까지는 20 dB 흡수율을 유지하고 있어, FSS 부착으로 경사입사 특성을 개선할 수 있음을 알 수 있다. 근본적으로 TE 편파에서 경사입사 특성을 개선하는 문제는 좀 더 심도 있는 분석과 향후 연구를 요한다.

4. 결 론

카보닐 철 분말 복합재를 사용하여 2.5 mm의 두께에서 -21 dB의 양호한 반사손실 값을 보이는 5.8 GHz용 전파흡수체를 제안하였다. 이 시편에 square loop 패턴의 저항성 FSS를 부착하여 반사손실을 -40 dB로 개선시킬 수 있었고, 어드미턴스 분석을 통하여 FSS 부착 효과를 규명하였다. 임피던스 정합을 이루는데 부족한 카보닐 철 분말 복합재의 자기손실을 FSS의 도체 저항이 보완함으로써 전파흡수율의 개선이 이루어졌음을 설명하였다. 스크린 프린팅 방법으로 저항성 FSS를 제조하고, 이를 카보닐 철 분말 복합재에 부착시켜 제조한 실측 시편에서 자유공간법으로 반사손실을 측정된 결과, 시뮬레이션 결과와 잘 일치함을 확인하였다. 저항성 FSS의 부착은 경사입사 특성의 개선에도 효과가 있다. TE, TM 편파 모두에서 입사각 35°까지 -20 dB 이하의 반사손실이 유지됨을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 2019년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (과제번호: 2019R1H1A2101121).

REFERENCES

1. K. P. Valavanis and G. J. Vachtsevanos, *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*, Springer, Netherlands (2015).
2. L. B. Li, L. Huang, M. Yang, C. B. Tan, and C. R. Matitsine, *Inter. Mater. Rev.* **58**, 203 (2013).
3. T. Maeda, S. Sugimoto, T. Kagotani, N. Tezuka, and K. Inomata, *J. Magn. Magn. Mater.* **281**, 195 (2004).
4. S.-S. Kim, S.-T. Kim, Y.-C. Yoon, and K.-S. Lee, *J. Appl. Phys.* **97**, 10F905 (2005).
5. S. T. Kim, H. S. Cho, and S. S. Kim, *IEEE Trans. Magn.* **41**, 3562 (2005).
6. W. Li, T. Wu, W. Wang, P. Zhai, and J. Guan, *J. Appl. Phys.* **116**, 044110 (2014).
7. Z. Xie, P. Liu, L. Y. Liu, Y. Feng, X. Wu, and X. Han, *J. Alloy. Compd.* **551**, 677 (2013).
8. Y. Liu, Y. Feng, X. Wu, and X. Han, *J. Alloy. Compd.* **472**, 441 (2009).
9. X. Shen, Y. Wang, X. Yang, L. Lu, and L. Huang, *J. Mater. Sci. Mater. Elect.* **21**, 630 (2010).
10. R. S. Meena, S. Bhattacharya, and R. Chatterjee, *Mater. Sci. Eng. B* **25**, 133 (2010).
11. M.-J. Park, J. Choi, and S.-S. Kim, *IEEE Trans. Magn.* **36**, 3272 (2000).
12. M. H. Umari, D. K. Ghodgaonkar, V. V. Varadan, and V. K. Varadan, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **40**, 19 (1991).
13. L. Qiao, R. Han, T. Wang, L. Tang, and F. Li, *J. Magn. Magn. Mater.* **375**, 100 (2015).
14. W. Wang, J. Guo, C. Long, W. Li, and J. Guan, *J. Alloy. Compd.* **637**, 106 (2015).
15. Y. C. Qing, D. D. Min, Y. Y. Zhou, F. Luo, and W. C. Zhou, *Carbon* **86**, 98 (2015).
16. B. A. Munk, *Frequency Selective Surfaces: Theory and Design*, John Wiley & Sons, New York (2000).
17. T. K. Wu, *Frequency Selective Surfaces*, John Wiley & Sons, New York (1995).
18. F. Coast, A. Monorchio, and G. Manara, *IEEE Trans. Antennas Propag.* **58**, 1551 (2010).
19. F. Costa and A. Monorchio, *IEEE Trans. Antennas Propag.* **60**, 4650 (2012).
20. L. Sun, H. Cheng, Y. Zhou, and J. Wang, *Opt. Express* **20**, 4675 (2012).
21. T. Liu and S.-S. Kim, *Korean J. Met. Mater.* **55**, 412 (2017).
22. T. Liu and S.-S. Kim, *Opt. Commun.* **117**, 1401 (2016).
23. T. Liu and S.-S. Kim, *Sci. Rep.* **8**, 13889 (2018).