

論文

탄소나노섬유와 NiFe 분말을 함유한 단층형 전자기파 흡수체

박기연*, 한재홍**, 이상복**, 김진봉**, 이진우**, 이상관**

Single-layered Microwave Absorbers containing Carbon nanofibers and NiFe particles

Ki-Yeon Park*, Jae-Hung Han**, Sang-Bok Lee**, Jin-Bong Kim**, Jin-Woo Yi**, Sang-Kwan Lee**

ABSTRACT

Carbon nanofibers (CNFs) were used as dielectric lossy materials and NiFe particles were used as magnetic lossy materials. Total twelve specimens for the three types such as dielectric, magnetic and mixed radar absorbing materials (RAMs) were fabricated. Their complex permittivities and permeabilities in the range of 2~18 GHz were measured using the transmission line technique. The parametric studies for reflection loss characteristics of each specimen to design the single-layered RAMs were performed. The mixed RAMs generally showed the improved absorbing characteristics with thinner matching thickness. One of the mixed RAMs, MD3 with the thickness of 2.00 mm had the 10 dB absorbing bandwidth of 4.0 GHz in the X-band (8.2~12.4 GHz). It also showed very broad 10 dB absorbing bandwidth as wide as 6.0 GHz in the Ku-band (12.0~18.0 GHz) with the thickness tuning to 1.49 mm. The experimental results for selected several specimens were in very good agreements with simulation ones in terms of the overall reflection loss characteristics and 10 dB absorbing bandwidth.

초 록

유전성 손실재료로 CNFs가 사용되었고, 강자성의 submicron 크기의 NiFe 분말을 자성 손실재료로 사용하였다. 획득한 손실재료의 함량과 혼합비에 따라 세 가지(dielectric, magnetic, mixed RAMs)의 타입으로 분류되고, 전체 12 종류의 복합재료를 제작하였다. 이들의 복소 유전율 및 투자율을 2~18 GHz 범위에서 측정하였다. 측정된 전자기적 물성과 다층형 매질에서의 투과 및 반사와 관련된 이론을 사용하여 단층형 흡수체를 설계할 위한 매개변수 연구를 수행하였다. 혼합형 타입의 하나인 MD3 복합재료는 2.00 mm의 두께로 X-band (8.2~12.4 GHz)에서 약 4.0 GHz의 10 dB 흡수 대역폭을 나타내었고, 1.49mm의 두께로 Ku-band (12.0~18.0 GHz)에서 약 6.0 GHz의 10 dB 흡수 대역폭을 나타내었다. 몇 종류의 복합재료에 대한 성능평가 실험이 수행되었고, 전반적인 흡수성능 경향과 10 dB 흡수 대역폭에서 예측 결과와 일치하였다.

Key Words : 전자기파 흡수재료 (radar absorbing materials), 탄소나노섬유 (carbon nanofibers), NiFe 분말 (NiFe particles), 복소 유전율 및 투자율 (complex permittivity and permeability), 반사 손실 (reflection loss)

1. 서 론

전자파 흡수체에 대한 많은 연구가 진행되고 있는 분야의 예로 스텔스 기술을 들 수 있다. 이것은 적의 레이더가 발생시

키는 전자파를 흡수 또는 산란시켜 포착되지 않도록 하는 레이더 포착 면적 (RCS, radar cross section)을 감소시키는 핵심 기술이다. 스텔스 기술은 형상 (shaping)을 제어하는 방법, 능동/수동 소자 (active/passive element)를 이용한 기술과 손실재료를

* KAIST 기계항공시스템학부 항공우주공학전공 대학원

**+ KAIST 기계항공시스템학부 항공우주공학전공, 교신저자(E-mail:jachunghan@kaist.ac.kr)

*** 한국기계연구원 부설 재료연구소 (KIMS) 복합재료그룹

첨가한 전자파흡수재료 (RAMs, radar absorbing materials)에 의한 연구가 있다 [1-4].

현재까지 유전성 손실재료를 함유한 유전성 흡수체와 자성 손실재료를 함유한 자성 흡수체에 관한 많은 연구들이 진행되었다. 하지만 이들의 경우에는 치명적인 몇 가지 문제점들이 존재한다. 유전성 흡수체의 경우에는 비교적 두꺼운 정합 두께를 갖고, 협대역의 흡수 성능을 나타낸다. 또한 자성 흡수체의 경우에는 다량 (약 70 wt% 이상)의 첨가로 인해 매우 무거운 경향을 나타내며, GHz 대역의 고주파수에서는 Snock's limit에 의해서 자성 손실이 급격히 저하되는 것으로 알려졌다. 최근 들어, 이러한 흡수체들의 단점을 보완하기 위한 유전성 및 자성 손실재료가 함께 적용된 흡수체에 대한 연구들이 진행되고 있다. Che [5]는 탄소나노튜브 (MWNT) 내부에 Fe를 화학적인 공정에 의해 삽입된 복합 분말을 제조하여 광대역 흡수체를 개발하였다. Saitoh [6]는 유전성의 titanium oxide 분말과 자성의 carbonyl iron 분말을 사용하여 광대역의 2 층형 흡수체를 제작하였다. He [7]는 유전성의 nanotitanium 분말과 자성의 micropowders (MMP)을 사용하고 최적설계를 접목하여 광대역 흡수체에 대한 해석 및 실험적 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 유전성 및 자성 손실재를 함유한 전자파 복합재료 흡수재료의 제작, 설계 및 성능평가를 목표로 하고 있다. 탄소나노섬유 (CNFs)를 유전성 손실재료로 사용하였고, 강자성의 submicron NiFe 분말을 자성 손실재료로 사용하였다. 획득한 손실재료의 함량과 혼합비에 따라 세 가지 (dielectric, magnetic, mixed RAMs)의 타입으로 분류되고, 전체 12 종류의 복합재료를 제작하였다. 복합재료의 분산 특성을 확인하기 위해 mixed RAMs의 단면을 관찰하였다. 제작된 복합재료의 복소 유전율 및 투자율을 2~18 GHz 범위에서 측정하였다. 단층형 흡수체를 설계하기 위해 측정된 전자기적 물성과 다층형 매질에서의 투과 및 반사와 관련된 이론을 사용하여 매개변수 연구를 수행하였다. 마지막으로 실험적 검증을 위한 성능평가를 통해 해석 결과와 비교 및 고찰하였다.

2. 전자기파 흡수 복합재료의 제작

2.1 손실재료

탄소나노튜브, 탄소나노섬유와 같은 탄소나노소재를 적용하여 복합재료로 제작하면 인장 강도, 탄성 계수, 열전도도, 전기전도도 등의 다양한 분야에서 적은 함량으로 높은 효율을 나타내는 것으로 알려졌다 [8].

본 연구에서는 유전성 손실재료로서 종횡비가 약 100 정도의 값을 지니며, 유전율 발현이 용이한 CNFs를 선택하였다. Showa

Denko (Japan) 사의 제품으로 vapor grown CNFs 이다. 평균 직경 (fiber diameter)은 약 150 nm, 평균 길이 (fiber length)는 10~20 μm 이다. 또한 자성 손실재료로서 강자성의 NiFe particles을 사용하였다. NiFe wire에 전기 폭발법 (pulsed wire evaporation method)을 적용하여 submicron 크기의 NiFe particles을 획득하였다. 제조사로부터 획득한 NiFe particles의 구성 성분은 52 at% Ni 과 48 at% Fe으로 나타났다.

2.2 복합재료의 제작

전자기파 흡수 복합재료의 제작 절차는 다음과 같다. 먼저, epoxy 수지, 경화제, 손실재료를 포함한 혼합물을 준비한다. 60 $^{\circ}\text{C}$ 를 유지한 중탕 조건에서 준비된 혼합물을 균질기 (homogenizer)를 사용하여 5000 rpm의 속도로 약 20 분간 충분히 분산시킨다. 그리고 혼합 과정에서 생성되어 혼합물에 포함된 불순물 (gas 등)을 제거하기 위한 탈포 과정을 거친다. 이러한 과정은 진공 상태로 80 $^{\circ}\text{C}$ 에서 약 20 분간 수행되었다. 그 후 120 $^{\circ}\text{C}$, 대기압 조건의 오토클레이브에서 2 시간 동안 성형되었다. 마지막으로 제작된 복합재료는 전자기적 물성 측정을 위해 toroid 형태 (inner diameter: 3 mm, outer diameter: 7 mm, thickness: 1.0 ~ 1.5 mm)의 시편으로 가공하였다.

전체 12 종류의 복합재료는 세 가지 타입으로 분류되었다. 유전성 타입의 시편은 D1, D2, D3으로 각각 표기하였고, 손실재료로서 CNFs만 사용되었다. 이들의 함량비는 0.5, 1.0, 2.0 wt%이다. 자성 타입의 시편은 M1, M2, M3으로 각각 표기하였고, 손실재료로서 NiFe particles 만 혼합하였다. 이들의 함량비는 10, 30, 50 wt%이다. 혼합형 타입의 시편은 6 종류가 제작되었다. 수지에 30 wt%의 NiFe particles가 포함된 혼합물에 CNFs를 추가로 각각 0.5, 1.0, 2.0 wt% 혼합한 복합재료를 제작하였고, 이들은 DM1, DM2, DM3로 표기하였다. 이것은 일정한 자성 손실재료가 포함된 복합재료에 유전성 손실재를 첨가하여 복소 유전율 및 투자율의 변화량을 살펴보기 위함이다. 또한 수지에 1.0 wt%의 CNFs가 포함된 혼합물에 NiFe particles을 추가로 각각 10, 30, 50 wt% 혼합한 복합재료를 제작하였고, 이들은 MD1, MD2, MD3로 표기하였다. 이는 일정한 유전성 손실재료가 포함된 복합재료에 자성 손실재를 첨가하여 복소 유전율 및 투자율의 변화량을 살펴보기 위함이다.

Fig. 1은 제작된 MD3 복합재료 시편의 단면에 대한 SEM 이미지를 나타낸다. CNFs의 경우에 rod 형태로 상대적으로 소량으로 나타났으며, NiFe particles은 함량이 상대적으로 다량인 관계로 국부적으로 응집된 영역을 나타내었으나 전체적으로 잘 관찰되고 있다. 따라서 CNFs와 NiFe particles을 함유한 이중의 필러를 함유한 복합재료를 제작하더라도, 충분히 분산이 잘 이루어졌음을 알 수 있다.

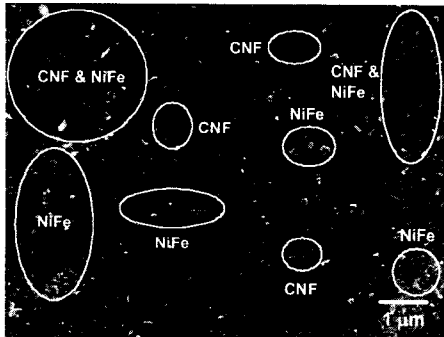


Fig. 1 SEM image of cross section of MD3 specimen.

2.3 복합재료의 전자기적 물성 측정

전송선로 기법 (transmission line technique)을 사용하여 복합재료의 전자기적 물성을 측정하였다. 회로 분석기 (Agilent N5230A)를 사용하여, 복합재료의 2 ~ 18 GHz 영역에서 S-parameters를 측정하고 이들의 크기와 위상을 사용하여 복소 유전율과 투자율을 획득하였다.

유전성 RAMs (D1, D2, D3)의 경우에는 CNFs 함량이 증가함에 따라 복소 유전율은 증가하는 경향을 보였고, 이들의 실수항과 허수항의 전체 분포는 $[10 < \epsilon'_r < 17.5, 1.4 < \epsilon''_r < 11.5]$ 로 나타났다. 비자성체이므로 복소 투자율의 경우 거의 공기의 값 $[\mu'_r = 1.0, \mu''_r = 0.0]$ 을 나타내었다. 이로부터 CNFs는 2.0 wt% 이하의 매우 작은 함량으로도 유전 손실을 발현할 수 있음을 알 수 있다. 자성 RAMs (M1, M2, M3)의 경우에는 NiFe 함량이 증가함에 따라 복소 유전율과 투자율은 증가하는 경향을 보였고, 복소 유전율의 실수항과 허수항의 분포는 $[2.9 < \epsilon'_r < 6.1, 0.1 < \epsilon''_r < 0.4]$ 로 비교적 낮은 값을 알 수 있다. 하지만 복소 투자율의 경우에는 실수항과 허수항의 전반적인 분포는 $[\mu'_r < 1.5, \mu''_r < 0.4]$ 로 향상된 결과를 나타내었다.

DM 계열의 혼합 RAMs (DM1, DM2, DM3)과 MD 계열의 혼합 RAMs (MD1, MD2, MD3)의 복소 유전율과 투자율 결과를 Fig. 2와 Fig. 3에 나타내었다. 먼저 DM 계열의 혼합 RAMs의 경우에는 복소 투자율의 경우에는 실수항 및 허수항이 거의 일정한 값을 나타내는 반면에 복소 유전율의 변화량이 현저하게 나타나고 있다. 이것은 자성 손실재의 함량을 고정하고 유전 손실재료인 CNFs 함량을 변화시켰기 때문에 나타난 결과이다. 한편 MD 계열의 혼합 RAMs의 경우에는 복소 유전율의 경우에는 실수항 및 허수항이 미소한 증감을 나타내는 반면에 복소 투자율의 변화량이 상대적으로 크게 나타나고 있다. 이것은 유전 손실재료의 함량을 고정하고 자성 손실재료의 함량을

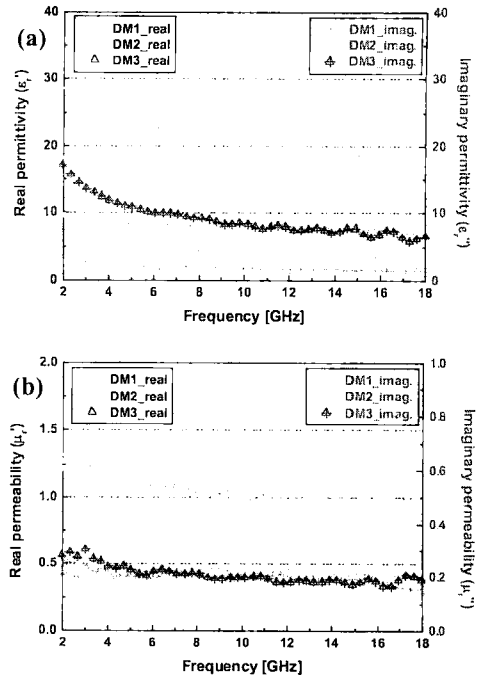


Fig. 2 Complex (a) permittivities and (b) permeabilities of fabricated mixed RAMs DM1, DM2 and DM3.

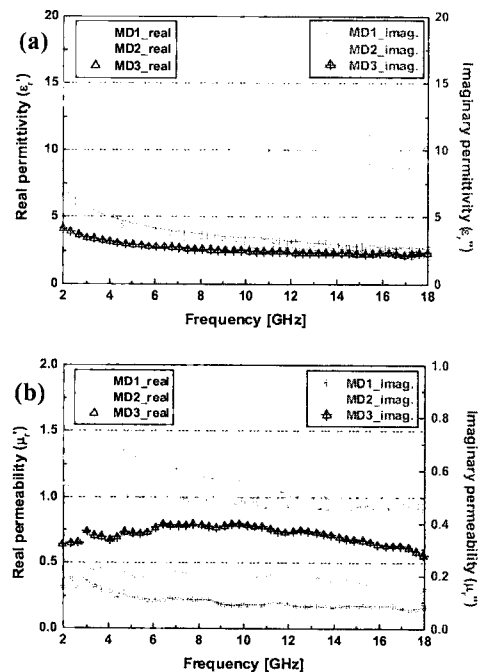


Fig. 3 Complex (a) permittivities and (b) permeabilities of fabricated mixed RAMs MD1, MD2 and MD3.

변화시켰기 때문이다. 자성재료의 경우에는 유전율 증감에 미치는 영향력이 상대적으로 작음을 알 수 있다. 전체적으로 혼합 RAMs의 복소 유전율 및 투자율의 분포는 $[6.8 < \epsilon_r' < 28.5, 1.4 < \epsilon_r'' < 17.0]$ 와 $[\mu_r' < 1.5, \mu_r'' < 0.4]$ 로 나타났다 혼합 RAMs (DM 계열)은 유전성 RAMs과 비교해서 자성 재료의 함량 증가에 따라서 유전율 및 투자율 분포가 증가하는 경향을 나타나고 있다. 혼합 RAMs (MD 계열)은 자성 RAMs과 비교하여 유전율의 증가는 나타나지만 투자율의 분포는 거의 비슷하다.

3. 단층형 전자기파 흡수체의 설계 및 성능 평가

3.1 전자기파 흡수체의 원리 및 이론

Fig. 4 (a)는 단층형 전자기파 흡수체 (두께 d)를 나타내고 있다. 전송선로 이론에 의해, 흡수체의 표면에서의 입력 임피던스는 $Z_{in} = Z_0 \frac{Z_d + Z_0 \tanh \gamma d}{Z_0 + Z_d \tanh \gamma d}$ 으로 표현된다. 여기서, 흡수체

의 임피던스 $Z_0 = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r}}$ 이고 ($\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ F/m, μ_0

$= 4 \times 10^{-7}$ H/m, ϵ_r and μ_r : complex relative permittivity and permeability, propagation constant $\gamma = j\omega \sqrt{\epsilon \mu}$), 완전 도체 (perfect electric conductor)의 경계조건을 갖는 거리 d 지점의 임피던스는 $Z_d = 0$ 이다. 따라서 입력 임피던스는 $Z_{in} = Z_0 \tanh \gamma d$

이다. 대기 중의 임피던스는 $Z_a = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}$ 이고, 반사되는 전자기

파를 최소화하는 임피던스 정합 조건 (impedance matching condition)은 $Z_{in} = Z_a$ 이다. 이러한 관계를 정리하면,

$1 = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tanh(j \frac{2\pi f d}{c} \sqrt{\mu_r \epsilon_r})$ 와 같다. 여기서, $c = 1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$ 는

광속 (speed of light)이다.

일반적으로 N층형 평면 매질 (Fig. 4 (b))에서 region i와 region i+1사이의 경계에서 일반 반사계수 ($\tilde{R}_{i,i+1}$)는 다음과 같이 정의된다 (eqn. 1).

$$\tilde{R}_{i,i+1} = \frac{R_{i,i+1} + \tilde{R}_{i+1,i+2} e^{2ik_{j+1,z}(d_{i+1} - d_i)}}{1 + R_{i,i+1} \tilde{R}_{i+1,i+2} e^{2ik_{j+1,z}(d_{j+1} - d_i)}} \quad (1)$$

여기서, $R_{i,i+1}$ 는 region i와 region i+1사이의 오직 두 경계영역에서의 반사계수를 나타내고, $k_{i,z}$ 는 region i에서의 복소 전파상수를 의미한다. 전력량 (power) 관점에서의 반사손실은 $RL [dB] = 20 \times \log_{10}(\tilde{R}_{i,i+1})$ 로 표현된다 [1, 9, 10].

3.2 단층형 전자기파 흡수체의 설계

단층형 전자기파 흡수체 설계를 위하여, 획득한 전자기적 물성 데이터와 앞선 수식들을 사용하여 반사손실 특성에 대한 매개변수 연구를 수행하였다.

먼저, X-band (8.2~12.4 GHz) 대역의 흡수체를 설계하기 위해 중심 주파수 10 GHz 에서의 12 종류의 복합재료 물성 데이터를 활용하여 두께 변화 (0~20 mm)에 따른 최대의 흡수 성능을 갖는 정합 두께를 찾았다. 그리고 주파수 영역 2~18 GHz 대역에서의 반사손실 특성을 살펴보았다. 전자기파 흡수체의 우수한 흡수능의 기준은 10 dB 흡수 대역 (10 dB absorbing bandwidth)으로 설정하였다. 이는 약 90% 이상의 전자기파를 흡수하는 주파수 대역을 의미한다.

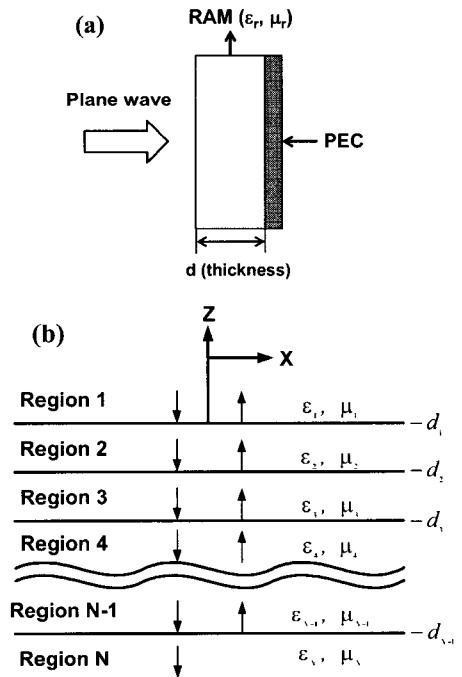


Fig. 4 (a) Single-layered microwave absorber and (b) reflection and transmission in a multi-layered medium.

Table 1 Calculated reflection loss characteristics of specimens in the X-band and Ku-band

Freq.	Type	Specimen	Matching thickness [mm]	[Max. RL] [dB]	10 dB absorbing bandwidth [GHz]
X-band (8.2~12.4 GHz)	Dielectric	D1	3.35	14.1	2.4 (9.0~11.4)
		D2	2.73	27.7	3.4 (8.6~12.0)
		D3	2.27	17.8	3.1 (8.5~11.6)
	Magnetic	M1	13.9	7.6	0.0
		M2	11.2	32.0	1.1 (8.9~11.0)
		M3	2.80	14.3	3.3 (8.5~11.8)
	Mixed	DM1	2.68	25.3	4.0 (8.4~12.4)
		DM2	2.07	15.0	3.2 (8.3~11.5)
		DM3	1.60	9.4	0.0
		MD1	2.47	24.6	3.6 (8.4~12.0)
		MD2	2.27	17.1	3.5 (8.6~12.1)
		MD3	2.00	16.7	4.0 (8.2~12.2)
Ku-band (12.0~18.0 GHz)	Dielectric	D2	1.93	24.5	5.1 (12.7~17.8)
	Magnetic	M3	2.03	18.0	5.6 (12.4~18.0)
	Mixed	DM1	2.00	29.2	6.0 (12.0~18.0)
		MD3	1.49	16.1	6.0 (12.0~18.0)

마찬가지로, Ku-band (12.0~18.0 GHz) 대역의 흡수체를 설계하기 위해 중심 주파수 15 GHz의 12 종류의 복합재료 물성 데이터를 활용하여 두께 변화 (0~10 mm)에 따른 최적의 흡수 성능을 갖는 정합 두께를 찾고 주파수 영역에서의 반사손실 특성을 계산하였다.

Table 1은 X-band 대역에서의 12 종류의 복합재료에 대한 정합 두께와 흡수 성능 및 Ku-band 대역에서의 우수한 흡수성능을 나타낸 4 종류의 복합재료에 대한 해석 결과를 요약하였다.

X-band 대역에서 결과를 살펴보면, 유전성 RAMs의 최대 흡수 성능을 나타내는 D2 복합재료는 2.73 mm의 두께로 약 3.4 GHz의 10 dB 흡수 대역을 나타내었고, 자성 RAMs의 경우에는 M3 복합재료가 2.80 mm의 두께로 약 3.3 GHz의 10 dB 흡수 대역을 나타내었다. 반면에 혼합 RAMs MD3은 2.00 mm의 두께로 약 4.0 (8.2~12.2) GHz의 10dB 흡수 대역을 나타내었다.

동일한 방법을 적용한 결과, Ku-band 대역에서는 혼합 RAMs MD3이 1.49 mm의 두께로 Ku-band 전체 영역을 포함하는 6.0 (12.0~18.0) GHz의 광대역의 10 dB 흡수 성능을 보여주었다. 전반적으로 유전성 혹은 자성 RAMs에 비하여 혼합 RAMs의 경우 상대적으로 얇은 두께로 보다 넓은 대역의 흡수

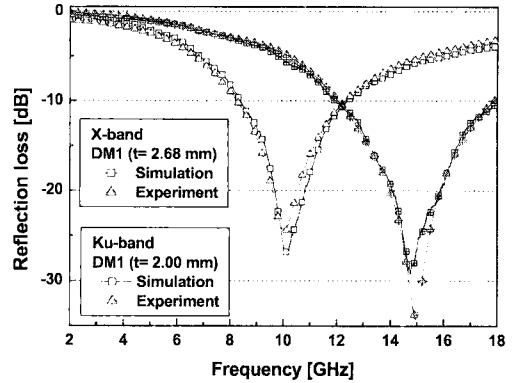


Fig. 5 Simulation and experimental results for reflection loss of DM1 specimens in the X- and Ku-band.

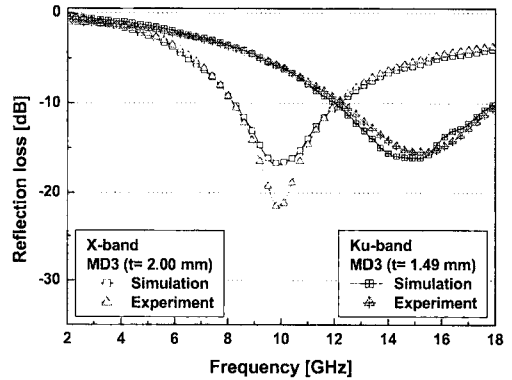


Fig. 6 Simulation and experimental results for reflection loss of MD3 specimens in the X- and Ku-band.

성능을 나타내고 있음을 알 수 있다.

3.3 단층형 흡수체의 제작 및 성능 평가

마지막으로 설계한 흡수체를 제작하여 성능평가를 위해 2~18 GHz 대역에서 반사손실을 측정하였다. X-band와 Ku-band 대역에서 가장 얇고 우수한 흡수 성능을 나타내는 혼합 RAMs DM1과 MD3 복합재료에 대해서 성능 평가를 수행하였다.

먼저, 해당하는 복합재료를 제작 및 설계 두께로 가공하였다. 완전도체의 경계 조건을 만족시키기 위해서 배면에 silver paste를 바르고 AI 평판을 접합함으로써 흡수 성능 측정을 위한 시편을 완성하였다. 회로 분석기를 사용하여 2~18 GHz 영역에서 반사손실 (S_{11} [dB])을 측정하였다. Fig. 5와 6은 DM1과 MD3 복합재료의 X-band와 Ku-band 대역에서의 예측 및 실험 결과를 보여준다. 실험 결과는 해석

결과와 비교하여 전반적인 흡수성능 경향 및 10 dB 흡수 대역폭에서 상당히 일치하는 결과를 나타내었다. 이로부터 본 연구에서 수행한 이종 재료의 분산을 통한 제조 기술은 복합재료를 추가로 제작하더라도 거의 동일한 물성을 획득할 수 있는 재현성을 확립하였음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 유전성 손실재, CNFs와 자성 손실재, NiFe particles를 함유한 전자파 복합재료 흡수재료의 제작, 설계 및 성능평가를 수행하였다. 전체 12 종류의 복합재료 시편을 제작하였고, 이종 재료의 분산 특성을 제작된 복합재료의 단면을 SEM 이미지를 통해 확인하였다. 이들의 전자기적 물성인 복소 유전율 및 투자율을 측정하였으며, 단층형 흡수체 설계를 위한 매개변수 연구를 수행하였다. 관심 주파수 대역인 X-band와 Ku-band에서 반사손실 특성을 예측하였다. 혼합 RAM MD3은 2.00 mm의 두께로 약 4.0 GHz의 10 dB 흡수 대역을 나타내었고, 1.49 mm의 두께로 Ku-band 전 영역 (12~18 GHz)에서 10 dB 흡수 성능을 보여주었다. 혼합 RAMs의 경우, 상대적으로 얇은 두께로 광대역의 흡수 성능을 나타내었다. 마지막으로 우수한 흡수 성능을 보인 몇 가지 복합재료들의 반사손실 특성을 측정함으로써 성능 평가를 수행하였다. 실험 결과는 설계한 흡수체들의 10 dB 흡수대역폭과 전반적인 흡수 경향에서 일치하는 특성을 나타내었다.

후 기

본 연구는 한국기계연구원 부설 재료연구소 기본연구사업 “전자기 특성 제어 복합 소재 성형기술”과 산업자원부 소재원천기술개발사업 “전자파흡수 고각형비 극미세 금속입자 복합화 기술”의 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Park KY, Lee SE, Kim CG, Han JH, “Fabrication and electromagnetic characteristics of electromagnetic wave absorbing sandwich structures,” *Composites Science and Technology*, Vol. 66, 2006, pp. 576-584.
- 2) 박기연, 이상복, 김진봉, 이진우, 이상관, 한재홍, “무전해 도금을 이용한 금속 코팅된 탄소나노섬유의 제조 및 미세조직,” 한국복합재료학회지, 제 20권, 제 5호, 2007, pp. 43-48.
- 3) Vinoy KJ, Jha RM. *Radar absorbing materials from theory to design and characterization*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1996.
- 4) 박기연, 한재홍, 이상복, 김진봉, 이진우, 이상관, “탄소나노섬유와 NiFe 분말을 함유한 전자기파 흡수 재료,” 한국복합재료학회 춘계학술대회 논문집, 2008, pp. 83-86
- 5) Che R, Peng L, Duan X, Chen Q, Liang X, “Microwave absorption enhancement and complex permittivity and permeability of Fe encapsulated within carbon nanotubes,” *Advanced Materials*, Vol. 16, 2004, pp. 401-405.
- 6) Saitoh M, Yamamoto T, Okino H, Chino M, Kobayashi M, “Double-layer type microwave absorber made of magnetic-dielectric composite material,” *Materials Research Innovations*, Vol. 5, 2002, pp. 208-213.
- 7) He Y, Gong R, Nie Y, He H, Zhao Z, “Optimization of two-layer electromagnetic wave absorbers composed of magnetic and dielectric materials in gigahertz frequency band,” *Journal of Applied Physics*, Vol. 98, 2005, pp. 084903: 1-5.
- 8) Iijima S, Iichashi T, “Single-shell carbon nanotubes of 1-nm,” *Nature*, Vol. 363, 1993, pp. 603-605.
- 9) Hayt W, Buck J. *Engineering Electromagnetics*. New York: McGraw-Hill, 2001.
- 10) Chew W. *Waves and fields in inhomogeneous media*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990.