

## 論文

## 탄소나노튜브 복합재 적층판을 활용한 전파흡수체의 설계 및 성능에 대한 연구

김진봉<sup>\*+</sup>, 김천곤<sup>\*\*</sup>

## Study on Design and Performance of Microwave Absorbers of Carbon Nanotube Composite Laminates

Jin-Bong Kim<sup>\*+</sup>, Chun-Gon Kim<sup>\*\*</sup>

## ABSTRACT

In this paper, we present an optimization method for the single Dallenbach-layer type microwave absorbers composed of E-glass fabric/epoxy composite laminates. The composite prepreg containing carbon nanotubes (CNT) was used to control the electrical property of the composites laminates. The design technology using the genetic algorithm was used to get the optimal thicknesses of the laminates and the filler contents at various center frequencies, for which the numerical model of the complex permittivity of the composite laminate was incorporated. In the optimal design results, the content of CNT increased in proportion to the center frequency, but, on the contrary, the thickness of the microwave absorbers decreased. The permittivity and reflection loss are measured using vector network analyzer and 7 mm coaxial airline. The influence of the mismatches in between measurement and prediction of the thickness and the complex permittivity caused the shift of the center frequency, blunting of the peak at the center frequency and the reduction of the absorbing bandwidth.

## 초 록

본 논문에서는 유리섬유 강화 복합재 적층판으로 이루어진 단일층 Dallenbach layer의 전파흡수체의 최적화 기법을 제시하고 그 성능을 분석하였다. 복합재 적층판의 전기적 특성을 제어하기 위해서 탄소나노튜브(CNT)를 혼합한 프리프레그를 사용하였다. 최적화 설계 기법은 유전자 알고리즘을 사용하였으며, 이를 이용하여 다양한 주파수에서 흡수체를 설계하고, 복합재의 두께 및 CNT 함유율을 최적화하였다. CNT 함유율의 최적화를 위해서는 복합재의 복소 유전율의 수치적 모델이 사용되었다. 전파흡수체의 최적설계에서 주파수에 따라서 CNT 함유율은 비례하여 증가하고, 흡수체의 두께는 반비례하여 감소한다. 흡수체의 -10 dB 흡수대역폭은 흡수체가 설계된 중심주파수에 비례하여 증가한다. 설계된 흡수체의 검증 위해서 10 GHz에서 중심주파수를 갖는 흡수체를 제조하고 그 성능을 평가하였다. 복합재 적층판의 복소 유전율과 전파흡수체의 반사손실은 벡터회로망분석기와 7 mm 동축관을 이용하여 측정하였다. 복합재의 두께와 복소 유전율에 있어서의 측정된 값과 예측치의 차이에 의해서 중심주파수의 이동, 중심주파수에서의 반사손실의 감쇄, 흡수대역폭의 감소가 발생하였다.

**Key Words :** 탄소나노튜브(Carbon nano tube), 전파흡수체(Microwave absorber), 복소 유전율(Complex permittivity), 유전상수(Dielectric constant), 전기전도도(Conductivity)

## 1. 서 론

전자파(레이더 신호) 흡수 기술은 군사적 측면뿐만 아니라 민수에서도 중요성이 증대되고 있는 기술이다. 군사적 측면

접수: 2011년 1월 27일, 수정: 2011년 4월 6일, 게재승인: 2011년 4월 12일

\*+ 한국기계연구원 부설 재료연구소 복합재료그룹, 교신저자(E-mail:jbkim@kims.re.kr)

\*\* 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공

에서는 이러한 기술은 스텔스 기능[1, 2]과 직결되고 있으며, 민수 분야에서도 거대한 토목 및 건축물(예를 들면, 풍력 발전기와 같은 대형 구조물)과 항공 교통 관제 레이더 사이의 간섭문제를 해결하기 위한 방법으로 사용 가능하다[3].

구조물에서 반사 또는 산란되어 나오는 전자파 신호의 강도는 구조물의 탐지 가능성을 결정하게 되는데, 이것은 결국은 레이더단면적(RCS) 문제로 귀결되게 된다. RCS 최소화 방법은 크게, 구조물의 형상을 바꾸는 방법과, 반사가 심한 선택된 일부분에 능동 또는 수동 소자를 사용하여 전자파를 상쇄시키는 방법과, 전자파 흡수체를 사용하는 방법이 있다.

그 중에서 전자파 흡수체를 이용하는 방법은 광대역 흡수능이 가능하며, 구조물의 개발에 있어 어느 단계이든 적용이 가능한 장점이 있다[4, 5].

Dallenbach type의 전자파 흡수체의 설계는 흡수층의 두께와 전자기적 특성을 이용하여 흡수체 표면에서의 입력 임피던스를 전파가 입사되는 공기 층의 임피던스와 일치시키는 방법을 사용한다. 이것은 결국 흡수층의 두께와 전자기적 특성의 최적 설계의 문제로 귀결된다[6].

전기 전도성의 소재를 고분자 기지에 분산시켜서 제조된 복합재를 흡수층으로 활용한 유전 손실형 전자파 흡수체는 분산된 전도성 소재가 보유하고 있는 자유전자가 전자파의 전기장(electric field)에 의해 이동하면서 발생시키는 전기 저항 손실(ohmic loss)을 이용하여 전자파를 열에너지로 변환시켜 흡수한다. 이러한 전자파 에너지의 흡수를 지배하는 복합재의 복소 유전율은 손실재료로 사용되는 전도성 소재의 종류와 그 함유율에 따라서 결정된다[7-16].

흡수층을 위한 복합재는 사용되는 소재와 제조방법에 따라서 매우 다양하게 연구되어 왔다. 최근 들어서는 기계적 특성이 우수한 유리섬유 강화 고분자 기지 복합재 적층판의 기지재에 카본블랙(CB), 탄소나노섬유(CNF), 탄소나노튜브(CNT)와 같은 탄소나노소재를 전도성 소재를 혼합한 전자파 흡수 구조에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[7-12].

Oh 등[7]은 CB를 분산시킨 glass/epoxy prepreg의 적층판을 이용한 연구를 수행하였다. 이들은 다양한 CB 함유율로 제조된 prepreg의 종류 및 적층 수를 조합하여 최적의 2개의 층을 가지는 흡수 구조를 개발하였다. Jung 등[8]은 CB와 다중벽 CNT를 혼합한 glass/epoxy prepreg를 이용한 연구를 수행하였다. 이들은 전자파 흡수구조의 배면판에 사용되는 carbon/epoxy 복합재 적층판과 흡수층을 구성하는 glass/epoxy 복합재의 열팽창계수의 차이로 인하여 발생하는 spring-back 현상에 대한 연구를 수행하였다. Lee 등[9]은 다중벽 CNT를 분산시킨 glass/epoxy prepreg의 적층판을 이용한 연구를 수행하였다. 이들의 연구는 Oh 등[7]의 연구방법과 유사하게 2층형 흡수체를 제조하기 위해서 이미 제조된 prepreg 중에서 두 가지 종류를 선택하여 조합하는 방법을 사용하였다. 이 연구에서는 적절한 prepreg 종류의 선택과 그 적층 수를 찾기 위한 최적설계기법으로 genetic algorithm을 사용하였다.

Park 등[10]은 CB를 분산시킨 glass/epoxy 적층판의 면재와 urethane foam의 심재로 구성된 샌드위치 구조에 대한 연구를 수행하였다. 이들은 최적의 샌드위치구조를 찾기 위해서 다양한 CB 함유율을 가지는 면재와 심재의 종류와 그 두께를 조합하여 계산된 흡수성능을 비교함으로써 최고의 성능을 나타내는 조합을 찾는 방법을 사용하였다. Chin 등[11]은 CB를 혼합한 polyester resin을 glass fabric에 도포한 후 적층하여 흡수구조를 제조하였다. 이들은 10 GHz에서 CB 함유율에 따라서 복소 유전율의 실수부와 허수부가 선형적으로 비례하여 증가한다고 가정하였으며, 이를 이용하여 단층형 흡수체를 위한 최적의 적층수 및 CB 함유율을 계산하였다. Kim 등[12]은 CB, CNF, 다중벽 CNT를 사용한 흡수구조에 대한 연구를 수행하였다. 이들은 탄소나노소재의 종류에 따라서 복합재료의 복소 유전율의 특성이 달라지며, 그것이 흡수체의 정합두께에 영향을 줌을 보여 주었다.

전자파 흡수체를 위한 전도성 소재에 대한 연구도 다양하게 수행되고 있다. Feng 등[13]은 CNT 표면에 nickel을 코팅하고 이를 poly(phthalazinone ether sulfone ketone)s (PPESK) 수지에 분산시킨 복합재를 이용하여 단층형 흡수체를 개발하였다. Lee 등 [14]은 에폭시 수지에 분산시킨 graphite nanoplatelet (GNP)의 산처리된 복소 유전율의 특성 변화를 관찰하고 그 변화가 전자파 흡수체에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다. Micheli 등[15]은 graphite, 다중벽 CNT, 단일벽 CNT, fullerene 및 CNF를 epoxy에 분산시킨 복합재를 제조하고 이를 활용하여 흡수체를 개발하였다. Rosa 등[16]은 Ni이 코팅된 탄소섬유, short carbon fiber (SCF) 및 다중벽 CNT를 혼합한 복합재를 제조하고 단층형 및 2층형 흡수체를 설계하였다.

앞에서의 연구들 중 대부분은 흡수체의 설계를 위해서 두 단계를 가지는 설계기법을 이용하였다. 첫 번째 단계에서는 미리 정해진 소재의 종류 및 함유율로 제조된 복합재료에 대한 복소 유전율을 실험적으로 확보한다. 두 번째 단계에서는 제조된 복합재료 중에서 흡수층으로 사용하기에 적합한 것을 선택하고, 그 흡수층의 최적의 두께를 얻는 기법을 사용하였다. 앞에서의 흡수체 설계기법에 있어서 손실재료의 함유율을 직접 최적화 변수에 사용하지 못하는 직접적인 원인은 주파수와 손실소재의 함유율에 따라서 비선형적인 분포를 가지는 복합재의 복소 유전율에 대한 모델을 얻기 어렵기 때문이다. (예외적으로, Chin 등[11]은 정해진 한 주파수에서 손실소재의 함유율에 따라서 복소 유전율이 선형적으로 증가한다는 가정으로 함유율의 최적화를 시도하였다.)

최근에 Kim 등[17]은 CB, CNF, 다중벽 CNT가 혼합된 Glass fabric/epoxy 적층판에 대한 마이크로파에서의 복소 유전율을 측정하고, 측정된 복소 유전율을 주파수 및 탄소나노소재의 함유율의 함수로 모사할 수 있는 모델을 발표하였다.

본 연구에서는 Kim 등[17]의 모델을 활용하여 마이크로파에서의 CNT를 함유한 복합재를 활용한 전파흡수체에 대한

최적화 기법을 제시하고, 다양한 주파수에 대해서 흡수체를 설계한 결과를 통하여 설계주파수가 흡수 구조의 두께 및 흡수대역폭을 포함한 흡수체 성능에 미치는 영향을 고찰하였다.

## 2. 복합재 적층판의 복소 유전율 모델

### 2.1 복합재 제조 및 복소 유전율 측정

본 연구에서는 HANWHA NANOTECH Co. Ltd. (Korea)에서 생산된 CNT (CM-95)를 1.0 ~ 4.0 wt.%의 비율로 혼합된 에폭시 수지를 이용하여 복합재 프리프레그를 제조하였다. 프리프레그를 제조하기 위해서 사용된 수지는 bisphenol A (BPA)계 에폭시 수지이며, 두께가 얇은 #110 EPC glass fabric (FAW=110 g/m<sup>2</sup>)의 표면에 그 수지를 코팅하여 프리프레그를 제조하였다. 제조된 프리프레그를 적층하여 복합재료 적층판을 제조하였다. 제조된 복합재료에서 프리프레그 한 장의 두께는 약 0.114±0.02 mm이며, 이때 적층판내의 R/C (resin content)는 약 43 wt.%이다. 복합재료 제조에 대한 상세한 사항은 Kim 등[17]의 논문에서 있다. Fig. 1은 CNT가 2wt.% 함유된 복합재료의 단면을 나타낸다. 대부분의 CNT는 복합재 층간의 수지과잉부(resin rich region)에 존재하며, 대체적으로 잘 분산되어 있음을 볼 수 있다. 제조된 복합재료 적층판의 복소 유전율은 Agilent N5230A (PNA-L vector network analyzer)와 7 mm 동축관을 이용하여 측정된 S-parameter로부터 Agilent 85071E (materials measurement software)를 이용하여 계산하여 구하였다. 복소 유전율의 계산은 4개의 S-parameter인  $S_{11}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{21}$ ,  $S_{22}$  모듈을 사용하여 복소 유전율을 계산하는 Nicolson-Ross-Weir 방법을 사용하였다[18]. 복소 유전율은 0.5 ~ 18.0 GHz의 주파수 범위에서 측정되었다.

### 2.2 복소 유전율 모델

Kim 등[17]은 퍼콜레이션 이론에 기초하여 복합재의 복소 유전율( $\epsilon_r$ )을 전도성 나노 소재의 함유율( $p$ )과 주파수( $f$ )의 함수로 나타낼 수 있는 수치 모델을 제시하였다. 복소 유전율( $\epsilon_r$ )은  $\epsilon_r = \epsilon'_r - j\epsilon''_r$ 로 표현된다.  $\epsilon'_r$ 는 유전상수이고  $\epsilon''_r$ 는 손실항으로서 재료의 교류 전기 전도도( $\sigma_{AC}$ )와  $\epsilon''_r = \sigma_{AC} / \omega\epsilon_0$ 의 관계를 가진다. 따라서 복합재료의 복소 유전율( $\epsilon_r$ )은 아래의 식 (1)과 같다.

$$\epsilon_r = \epsilon'_r - j\sigma_{AC} / 2\pi f \epsilon_0 \quad (1)$$

Kim 등[17]이 제시한 모델에서 유전상수( $\epsilon'_r$ )와 전기 전도도( $\sigma_{AC}$ )는 아래 식 (2), (3)과 같이 표현된다.

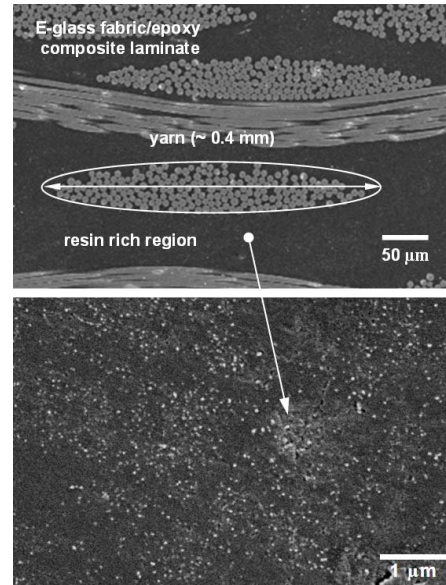


Fig. 1 Cross sectional configurations of the composite laminate containing 2wt.% of CNTs. Most of CNTs are distributed in the resin rich region [17].

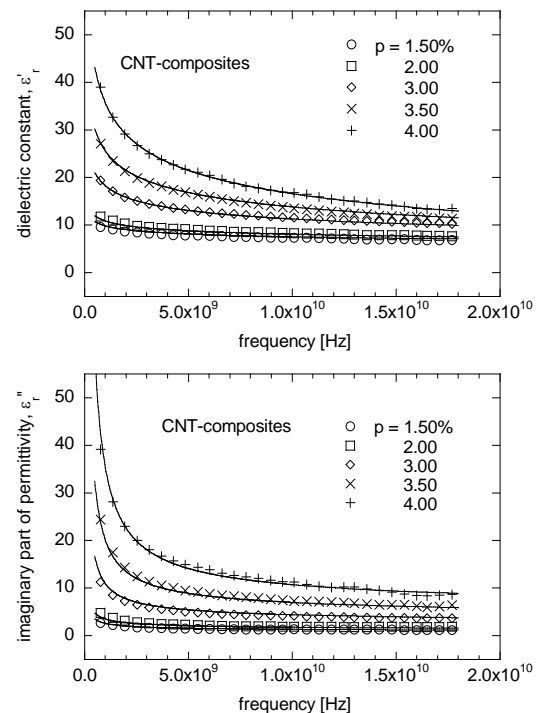


Fig. 2 Complex permittivity of the E-glass fabric/epoxy composite laminates containing carbon nanotubes; Symbols are experimental data and solid lines are the best fittings to the equations from (1), (2), (3) and (4) [17].

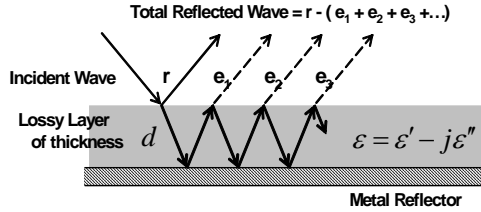


Fig. 3 Schematic drawing of the Dallenbach layer.

$$\sigma_{AC} = K_1 f^x + K_2 \quad (2)$$

$$\epsilon'_r = K_3 f^{-y} + K_4 \quad (3)$$

단, 식 (2), (3)에서  $K_i$ 는 식 (4)와 같이 복합재의 CNT 함유율( $p$ )의 함수이다.

$$K_i = a_i (p - p_c)^{b_i} + c_i \quad \text{단, } i=1, 2, 3 \text{ and } 4 \quad (4)$$

식 (4)에서  $p_c$ 는 퍼콜레이션 임계값이며,  $x, y, a_i, b_i$  및  $c_i$ 와 함께 측정된 복합재의  $\epsilon_r$ 로부터 얻을 수 있다. 따라서,  $\epsilon_r$ 의 수치 모델에서는  $\epsilon_r(p, f)$ 의 형태로 표현된다.

Fig. 2는 측정된 CNT 복합재의  $\epsilon_r$ 과 Kim 등[17]에서 제시된 복소 유전율의 모델로 계산된 값을 보여준다.

### 3. 전자파 흡수 구조의 최적설계

#### 3.1 Dallenbach Layer 흡수체

Fig. 3은 Dallenbach Layer 흡수체의 개략도이다[6]. Dallenbach Layer 흡수체의 전자파 반사계수 ( $R$ )은 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$R.L = \frac{\eta \tanh(\gamma d) - 1}{\eta \tanh(\gamma d) + 1} \quad (5)$$

식 (5)에서 특성 임피던스( $\eta$ )와 전파상수( $\gamma$ )는 전자파가 흘러가는 매질이 되는 복합재료의 복소 유전율( $\epsilon_r$ )과 복소 투자율( $\mu_r$ )의 함수이다. 본 논문에서와 같이 전기 전도성 소재를 이용한 유전 흡수체의 경우 복소 투자율( $\mu_r$ )의 값이 1이므로 특성 임피던스( $\eta$ )와 전파상수( $\gamma$ )는 각각  $\eta = \sqrt{1/\epsilon_r}$ 와  $\gamma = j2\pi f \sqrt{\epsilon_r} / c$ 로 표현될 수 있다. 이때  $c$ 는 진공에서의

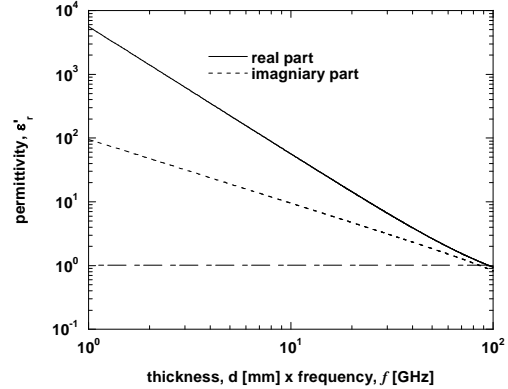


Fig. 4 Complex permittivity of non-reflection versus thickness [mm] multiplied by frequency [GHz]. The real and imaginary parts of the permittivity are shown separately.

빛의 속도이다. 식 (1)의 해는 반사손실의 분모가 '0'이 되는 경우이다. 따라서 식 (5)는 아래와 같이 쓸 수 있다 [12].

$$\tanh(j2\pi f d \sqrt{\epsilon_r} / c) = \sqrt{\epsilon_r} \quad (6)$$

식 (6)을 만족하는 복소 유전율( $\epsilon_r$ )의 해는 흡수층의 두께( $d$ )와 주파수( $f$ )의 곱인  $df$ 에 따라서 아래 Fig. 4와 같이 얻어질 수 있다.

#### 3.2 Dallenbach 형 전자파 흡수체의 최적설계

Fig. 4에서 Dallenbach layer 흡수체에서 정합조건에서의 복소 유전율은 실수부가 허수부보다 항상 크고  $df$ 의 값이 작을수록 단위 두께나 주파수의 변화에 의한 복소 유전율의 변화가 더 커진다는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 Fig. 4에서 얻어진 무(無)반사  $\epsilon_r$  (complex permittivity of non-reflection)과 3, 10, 15 GHz의 주파수에서 복소 유전율 모델을 활용하여 계산된 복합재의  $\epsilon_r$ 을 Cole-Cole 선도에 대입하여 그린 것이다. 여기에서,  $df$ 의 값에 따라서 무반사  $\epsilon_r$ 의 허수부의 변화는 실수부의 변화에 비해 매우 작기 때문에 무반사  $\epsilon_r$ 은 거의 그래프의 수평으로 나타난다. 이 그림에서 무반사  $\epsilon_r$ 과 복합재의 복소 유전율 모델이 만나는 점에서 최적의 복합재  $d$ 와 CNT의  $p$ 가 결정된다. 무반사  $\epsilon_r$  근처에서는 3, 10, 15 GHz에서의 주파수에서 모두 복합재의  $\epsilon_r$ 의 실수부의 증가율이 허수부의 증가율보다 높음을 볼 수 있다. 주목하여야 할 것은, 주파수 별로 무반사  $\epsilon_r$ 과 복합재의  $\epsilon_r$ 이 만나는 점에서의  $df$  값의 차이가 그 주파수의 차이에

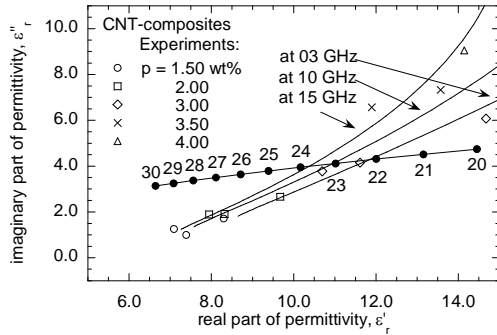


Fig. 5 Cole-Cole plots composed of the complex permittivity of non-reflection for Dallenbach layer absorbers and CNT-composites at 3, 10 and 15 GHz. The thickness and filler concentration of an absorber can be determined at each crossing point between simulated permittivity of composites and that of the Dallenbach layer.

비해서는 매우 작다는 것이다. 이것은 흡수체의  $d$ 가 주파수에 비해서 거의 반비례한다는 것을 의미한다.

전파 흡수체를 설계하기 위한 CNT의  $p$ 와 흡수체의  $d$ 를 얻기 위해서 최적설계법인 유전자 알고리즘을 사용하였다 [19]. 본 연구에서는 CNT의  $p$ 를 설계하기 위해서 Kim 등 [17]이 제시한 복소 유전율 모델을 사용하였다. 식 (1)에서 (4)까지를 식 (5)에 대입하면, 식 (5)에서  $R$ 은 흡수체의  $d$ 와 CNT의  $p$ 의 함수로 나타낼 수 있다. 따라서, 최적설계를 위한 목적함수( $F$ )를 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$F = 1 - |R|^2 \quad \text{단, } 0 \leq |R(d, p)| \leq 1 \quad (7)$$

## 4. 결과 및 검토

### 4.1 주파수에 따른 흡수체의 특성 분석

Fig. 6은 최적설계의 결과를 활용하여 3, 5 그리고 10 GHz를 중심주파수( $f_c$ ) 설계된 Dallenbach layer 흡수체의 반사손실(Reflection Loss,  $RL: RL = 20 \log |R|$ )을 주파수에 따라서 보여준다

Table 1은 세 개의  $f_c$ 에서 각각 설계된 흡수체의  $d$ , 탄소 나노튜브의  $p$ 와 함께, 10 dB 흡수대역폭( $\Delta f_{10dB}$ )과 그 하한(lower bound) 및 상한(upper bound)을 나타낸다.

Table 1에서  $\Delta f_{10dB}$ 은  $f_c$ 에 비례하여 증가하는 것을 볼 수 있다. 이것은 식(5)에서  $R$ 이  $df$ 의 함수이기 때문에 나타나는 현상이다. 즉, 임의의 주파수와 흡수체의  $f_c$ 와의 차이( $\Delta f$ )가  $R$ 에 미치는 영향은  $d \times \Delta f$ 의 크기로 나타나게 되는데, 높은

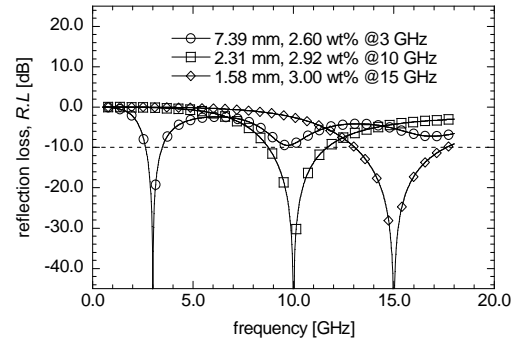


Fig. 6 Reflection losses of Dallenbach layers designed at the center frequencies of 3, 10 and 15 GHz. The absorption bandwidth is proportional to the center frequency.

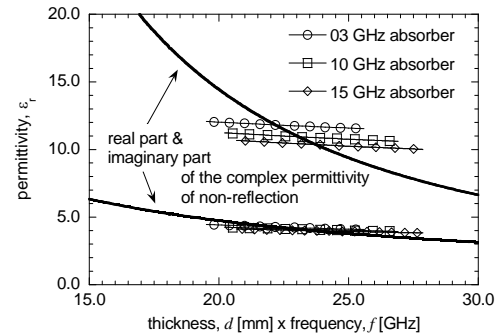


Fig. 7 Comparison between the complex permittivity of non-reflection and those of composites for Dallenbach layers designed at center frequencies at 3, 10 and 15 GHz versus thickness [mm] multiplied by frequency [GHz]. Each frequency range for the permittivity of the composite is the 10 dB bandwidth for the respective Dallenbach layer.

Table 1 Thicknesses, CNT concentrations of composites and 10 dB bandwidths including their lower, upper bounds of Dallenbach layers designed at the center frequencies of 3, 10 and 15 GHz

	Center frequency ( $f_c$ ) [GHz]		
	3	10	15
Thickness of absorber ( $d$ ) [mm]	7.39	2.31	1.58
CNT concentration ( $p$ ) [wt.%]	2.60	2.92	3.00
10 dB bandwidth ( $\Delta f_{10dB}$ ) [GHz]	0.82	2.90	4.54
Lower bound of $\Delta f_{10dB}$ ( $f_{lb}$ ) [GHz]	2.64	8.76	13.06
Upper bound of $\Delta f_{10dB}$ ( $f_{ub}$ ) [GHz]	3.46	11.66	17.6

$f_c$ 에서 흡수체의  $d$ 가 작아지면 동일한  $\Delta f$ 에 대한  $d \times \Delta f$  값이 줄어들기 때문이다.

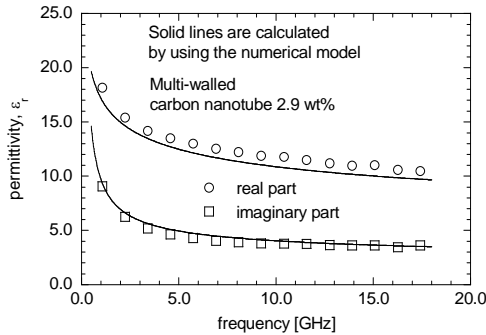


Fig. 8 Comparison between the simulation and the measurement of complex permittivity of the composite containing 2.9 wt.% of CNTs.

Dallenbach layer 흡수체의 흡수대역폭에 영향을 미치는 요인은  $d$ 와 함께 복합재의  $\epsilon_r$ 와 무반사  $\epsilon_r$ 의 차이가 있다. Fig. 7은 세 개의  $f_c$ 에서 설계된 흡수체에서의 복합재의  $\epsilon_r$ 을  $df$ 의 함수로 나타내고, 이를 무반사  $\epsilon_r$ 과 비교한 그림이다. 각각의 흡수체를 위한 복합재의  $\epsilon_r$ 은  $\Delta f_{10dB}$  내에 포함되는 주파수 영역의 값만 표시하였다.

Fig. 7에서, 복합재의  $\epsilon_r$ 은  $df$ 에 따라서 거의 변화가 없지만 무반사  $\epsilon_r$ 의 실수부는 거의  $\epsilon_r' \propto 1/(df)^2$ 의 관계를 가진다. 따라서, 높은  $df$ 에서 정합이 발생할 수록 흡수체의  $R$ 은  $df$ 의 변화에 덜 민감하고, 결국 흡수대역폭이 증가할 것으로 유추할 수 있다. 본 연구의 결과에서도 3, 10 및 15 GHz에서의  $df_c$ 가 22.18, 23.08 및 23.75 GHz.mm로 그 차이가 미미하지만 조금씩 증가함에 따라서  $\Delta f_{10dB}$ 에 각각의 흡수체의  $d$ 를 곱한 값은 8.57, 8.90 및 9.20 GHz.mm로 비례하여 증가함을 볼 수 있다.

정합이 발생하는  $df_c$ 를 중심으로  $df < df_c$  일 때와  $df > df_c$  일 때의  $df$ 의 변화에 따른 복합재의  $\epsilon_r$ 와 무반사  $\epsilon_r$ 의 차이가 다르기 때문에  $df_c$ 를 중심으로 양쪽의 흡수대역폭의 차이가 발생한다. 실제로 table 1에서  $f_c - f_{lb}$ 의 크기보다  $f_{up} - f_c$ 의 크기가 큰 것을 볼 수 있다.

Kim 등[12]은 단일층 Dallenbach layer 흡수체에서 정합에 필요한 복합재의  $\epsilon_r'$ 가  $\epsilon_r''$ 보다 크면  $d$ 가 얇은 흡수체를 설계할 수 있지만, 흡수체의  $d$ 가 얇아지면  $\Delta f_{10dB}$ 이 감소함을 보였다. 이것은, 복합재의  $\epsilon_r$ 이 주파수에 대해 상수라고 가정하면, Fig. 7에서 볼 수 있는 바와 같이 동일한  $f_c$ 를 가지는

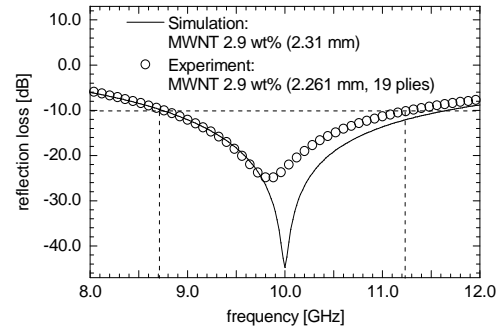


Fig. 9 Comparison between the calculation and the measurement of reflection losses of microwave absorber.

흡수체라도  $d$ 가 얇아지면  $df_c$ 가 감소하여 흡수체의  $R$ 이  $df$ 의 변화에 더 민감하게 되기 때문이다. 그러나, 만일 Fig. 7에서 복합재의  $\epsilon_r'$ 의 주파수에 따른 감소폭이 더 커져서 무반사  $\epsilon_r'$ 에 가까워지면 흡수체의 흡수대역폭이 증가할 수 있음을 예측할 수 있다. Rosa 등[16]은 Ni이 코팅된 탄소섬유와 SCF(short carbon fiber)가 혼합된 복합재를 활용하여 10 GHz에서  $f_c$ 를 가지는 2.71 mm 흡수체에서 5.14 GHz의  $\Delta f_{10dB}$ 을 얻었는데, 이것은 본 논문의 Fig. 7에서 얻은 결과에서 살펴볼 수 있는 바와 같이 주파수에 따른 복합재의  $\epsilon_r'$ 의 감소폭이 비교적 크기 때문이다.

## 4.2 10 GHz에서의 레이더 흡수구조 제조 및 성능평가

10 GHz에서  $f_c$ 를 가지는 흡수체를 제조하고 그 성능을 평가하였다. 흡수체는 19장이 적층된 프리프레그와 금형 사이에 2 mm 두께의 알루미늄 평판을 부착하여 오토클레이브로 일체성형하여 제조하였다. Fig. 8은 2.9 wt.%의 탄소나노튜브가 함유된 복합재의 복소 유전율을 측정된 결과와 수치 모델을 활용하여 계산된 값을 비교한 것이다. 10 GHz에서의  $\epsilon_r$ 의 실수부의 경우 측정된 값이 계산된 값에 비하여 약 1.0이 크고, 허수부의 경우는 약 0.2가 작다. 측정된  $\epsilon_r$ 을 Fig. 5에 대입하면 그 위치가 10 GHz에서 설계된 흡수체의 정합에 필요한  $\epsilon_r$ 의 오른쪽 아래가 됨을 예상할 수 있다. 따라서, 측정된  $\epsilon_r$ 은 Fig. 5에서의 10 GHz의 정합조건보다 더 작은  $df$ 를 가지며, 정합의 정도도 약화될 것으로 예상할 수 있다. 제조된 흡수체에서 복합재 평판의 두께는 약 2.261 mm로서 설계값보다 0.05 mm가 더 얇으므로 앞에서의 줄어드는  $df$ 의 영향으로 인하여 흡수체의 중심주파수가 낮은 주파수로 이동할 것으로 예상할 수 있다.

평판으로 제조된 전파흡수체를 가공하여 동축관용 시편을 제조하여 그 흡수 성능을 측정하였다. Fig. 9은 측정된 흡수 성능과 설계한 결과를 비교한 그림이다. 여기에서, 측정된 흡수체에서  $f_c$ 가 10 GHz보다 낮은 주파수로 이동하였고, 최대  $R.L$ 이 24.6 dB,  $\Delta f_{10dB}$ 이 2.5 GHz로 설계한 결과보다 감소하였다.

## 5. 요약

복합재의 복소 유전율( $\epsilon_r$ )의 수치 모델을 활용하여 전파 흡수체를 설계하고 흡수체의 중심주파수( $f_c$ )가 흡수체의 두께( $d$ )와 흡수대역폭에 미치는 영향을 분석하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

- 1) Cole-Cole 선도로 나타낸 특정한 주파수( $f$ )에서의 CNT의 함유율( $p$ )에 따른 복합재의 복소 유전율( $\epsilon_r$ )의 증가 경로는 주파수( $f$ )에 따라서 그 차이가 매우 작으며, 이러한 작은 경로의 차이는 낮은 중심주파수( $f_c$ )의 흡수체의 두께( $d$ )가 크게 증가하는 원인이다.
- 2) 흡수체의 10 dB 흡수대역폭( $\Delta f_{10dB}$ )은 흡수체의 중심주파수( $f_c$ )에 비례하여 증가한다. 이러한 비례관계는 흡수체의 반사계수( $R$ )의 지배방정식이 흡수체의 두께( $d$ )와 주파수( $f$ )의 곱인  $df$ 의 함수인 반면에 서로 다른 중심주파수( $f_c$ )로 설계된 흡수체 사이의  $df_c$ 의 차이가 매우 작기 때문이다.
- 3) 무반사 복소 유전율( $\epsilon_r$ )의 실수부( $\epsilon'_r$ )는  $\epsilon'_r \propto 1/(df)^2$ 의 관계를 가지는 반면 이에 비하여 복합재의 것은  $df$ 에 대해 변화가 매우 작다. 따라서, 전파흡수체에서는  $df_c$ 가 클수록, 특히 중심주파수( $f_c$ )가 동일한 흡수체 사이에서는 두께( $d$ )가 클수록, 흡수대역폭이 증가한다. 그리고, 동일한  $df_c$ 의 흡수체에서도 복합재의 복소 유전율( $\epsilon'_r$ )의 주파수에 따른 감소율이 증가하면 광대역의 흡수대역폭을 얻을 수 있다.

10 GHz에서 중심주파수( $f_c$ )를 갖는 흡수체를 제조하고 그 성능을 평가하였다. 측정된 흡수체에서 중심주파수( $f_c$ )가 10 GHz보다 낮은 주파수로 이동하였고, 중심주파수( $f_c$ )에서의 반사손실( $R.L$ )이 24.6 dB, 이 2.5 GHz로 설계한 결과보다

감소하였다. 이러한 차이는 실제 제조된 복합재의 복소 유전율( $\epsilon_r$ )과 흡수체 두께( $d$ )가 설계를 위해서 사용한 값들과는 차이가 있고, 이로 인하여 원하는 설계주파수에서 정확한 정합이 발생하지 않았기 때문이다.

## 후 기

본 연구는 지식경제부 신재생에너지기술개발사업의 일환(2008-N-WD08-P-02)으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- 1) R.A. Stonier, "Stealth aircraft & technology from World War II to the Gulf, Part I: History and Background," *SAMPE Journal*, Vol. 27, No. 4, 1991, pp. 9-17.
- 2) R.A. Stonier, "Stealth aircraft & technology from World War II to the Gulf, Part II: Applications and Design," *SAMPE Journal*, Vol. 27, No.5, 1991, pp. 9-18.
- 3) M. Bryanton, et al., "Stealth technology for wind turbines," BERR Report No. TES101865, 2007, UK.
- 4) K.J. Vinoy, R.M. Jha, "Radar Absorbing Materials from Theory to Design and Characteristics," *Boston/Dordrecht/London: Kruwer Academic Publishers*, 1996.
- 5) E.F. Knott, J.F. Shaeffer, M.T. Tuley, "Radar Cross Section Its Prediction, Measurement and Reduction," *Artech House, Inc.*, 1985, USA.
- 6) W. Dallenbach, W. Kleinstueber, "Reflection and absorption of decimeter waves by plane dielectric layers," *Hochfrequenztech und Elektroakust*, Vol. 51, 1938, pp. 152-156.
- 7) J.H. Oh, K.S. Oh, C.G. Kim, C.S. Hong, "Design of radar absorbing structures using glass/epoxy composite containing carbon black in X-band frequency ranges," *Composites: Part B*, Vol. 35, 2004, pp. 49-56.
- 8) W.K. Jung, B.K. Kim, M.S. Won, S.H. Ahn, "Fabrication of radar absorbing structure (RAS) using GFR-nano composite and spring-back compensation of hybrid composite RAS shells," *Composite Structures*, Vol. 75, 2006, pp. 571-576.
- 9) S.E. Lee, J.H. Kang, C.G. Kim, "Fabrication and design of multi-layered radar absorbing structures of MWNT-filled glass/epoxy plain-weave composites," *Composite Structures*, Vol. 76, 2006, pp. 397-405.
- 10) K.Y. Park, S.E. Lee, C.G. Kim, J.H. Hahn, "Fabrication and electromagnetic characteristics of electromagnetic wave absorbing sandwich structures," *Composites Science and Technology*, Vol. 66, 2006, pp. 576-584.

- 11) W.S. Chin, D.G. Lee, "Development of the composite RAS (radar absorbing structure) for the X-band frequency range," *Composite Structures*, Vol. 77, 2007, pp. 457-465.
- 12) J.B. Kim, S.K. Lee, C.G. Kim, "Comparison study on the effect of carbon nano materials for single-layer microwave absorbers in X-band," *Composites Science and Technology*, Vol. 68, 2008, pp. 2909-2916.
- 13) X. Feng, G. Liao, J. Du, L. Dong, K. Jin, X. Jian, "Electrical conductivity and microwave absorbing properties of nickel-coated multiwalled carbon nanotubes/poly(phthalazinone ether sulfone ketone)s composites," *Polymer Engineering & Science*, Vol. 48, 2008, pp. 1007-1014.
- 14) S.E. Lee, O.Y. Choi, H.T. Hahn, "Microwave properties of graphite nanoplatelet/epoxy composites," *Journal of Applied Physics*, Vol. 104, 2008, pp. 033705.
- 15) D. Micheli, C. Apollo, R. Pastore, M. Marchetti, "X-Band microwave characterization of carbon-based nanocomposite material, absorption capability comparison and RAS design simulation," *Composites Science and Technology*, Vol. 70, 2010, pp. 400-409.
- 16) I.M.D. Rosa, A. Dinescu, F. Sarasini, M.S. Sarto, A. Tamburrano, "Effect of short carbon fibers and MWCNTs on microwave absorbing properties of polyester composites containing nickel-coated carbon fibers," *Composites Science and Technology*, Vol. 70, 2010, pp. 102-109.
- 17) J.B. Kim, C.G. Kim, "Study on the semi-empirical model for the complex permittivity of carbon nanocomposite laminates in microwave frequency band," *Composites Science and Technology*, Vol. 70, 2010, pp. 1748-1754.
- 18) J. Baker-Javis, et al., "Transmission/reflection and short-circuit line methods for measuring permittivity and permeability," NIST Technical Note 1355-R, 1993.
- 19) D.E. Goldberg, "Genetic Algorithm in Search, Optimization, and Machine Learning," *Addison-Wesley Publishing Company*, Inc., 1989, USA.