

반도체 섬유 강화 복합재료를 이용한 전자파 흡수 구조

최재훈* · 남영우* · 김천곤*[†] · 이원준**

Microwave Absorbing Structure Using Semiconductive Fiber Reinforced Composite

Jae-Hun Choi*, Young-Woo Nam*, Chun-Gon Kim*[†], Won-Jun Lee**

ABSTRACT: This paper deals with the fabrication and verification of the microwave absorbing structure using semiconductive fiber reinforced composite. Two kinds of fiber were used to fabricate composites. Electromagnetic properties of the composites were measured by freespace measurement system over X-band. Two single slab absorbers and a double slab absorber were designed by thickness optimization method. Single slab absorbers did not show good microwave absorption performance because the permittivity is away from non-reflection curve. Double slab absorber complemented the limitations on single slab absorber and it showed good microwave absorption performance. Double slab absorber showed -43.9 dB loss near 10 GHz.

초 록: 본 연구에서는 반도체 섬유 강화 복합재료를 이용하여 전자파 흡수 구조를 제작하였다. 두 종류의 반도체 섬유를 사용하여 복합재료를 제작하고, 자유공간 측정 장비를 이용하여 각각의 전자기적 물성을 측정하였다. 두께 최적화 방법으로 두 종류의 단층형 흡수 구조와 한 종류의 이중층형 흡수 구조를 설계하였다. 설계한 전자파 흡수 구조를 반도체 섬유 강화 복합재료로 제작하고 그 흡수 성능을 측정하였다. 사용된 두 재료의 유전율은 Cole-Cole plot에 나타내었을 때 무반사 곡선에 가깝지 못하여 높은 흡수 성능을 기대하기 어려웠다. 두 종류의 재료로 제작한 단층형 흡수 구조는 10 GHz 근처에서 각각 -14.2 dB와 -8.8 dB의 흡수 성능을 보였다. 이러한 한계점을 보완할 수 있는 이중층 전자파 흡수 구조는 10 GHz 근처에서 -43.9 dB의 좋은 흡수 성능을 보였다. 반도체 섬유 강화 복합재료로 제작한 이중층 전자파 흡수 구조는 기존의 전자파 흡수 구조에 비해 간단한 제작 과정을 거쳐 좋은 흡수 성능을 갖는 흡수 구조를 얻을 수 있었으며, 상대적으로 더 적은 오차 요인을 갖고 있다.

Key Words: 전자파 흡수 구조(Microwave absorbing structure), 반도체 섬유(Semiconductive fiber), 다기능 복합재료(Multifunctional composite), 복소 유전율(Complex permittivity)

1. 서 론

전자 기술의 발전과 다양한 전자 기기의 보급과 함께 필요한 전자기파를 흡수할 수 있는 전자파 흡수체의 필요성은 지속적으로 커졌다. 전자파 간섭과 전파 암실, 스텔스 기술 등의 분야에서 전자파 흡수체에 대한 다양한 요구 조

건이 존재한다. 전자파 흡수체는 흔히 전파 암실 구성에 사용되는 피라미드 타입과 같은 임피던스 경사형(Graded Interfaces) 흡수체와 얇은 판 형태의 공진형(Resonant) 흡수체로 구분할 수 있다[1]. 임피던스 경사형 흡수체는 일반적으로 넓은 전자파 주파수 대역에서 좋은 흡수 성능을 가질 수 있으나 흡수체가 차지하는 부피가 크기 때문에 이를 활

Received 15 March 2016, received in revised form 17 June 2016, accepted 28 June 2016

*Department of Aerospace Engineering, KAIST

*[†]Department of Aerospace Engineering, KAIST, Corresponding author (E-mail: cgkim@kaist.ac.kr)

**Agency for Defense Development (ADD)

용할 수 있는 범위에 한계가 있다. 반면에 공진형 흡수체는 얇은 판 형태이기 때문에 그 활용 범위는 넓으나 흡수하는 전자파 주파수의 대역폭에 한계가 있다[2].

공진형 전자파 흡수체는 구조의 구성 요소와 형태에 따라 Salisbury screen, Jaumann, Dallenbach 등으로 구분된다[1]. 흡수체는 재료의 전자기적 물성과 설계에 따라 입력 임피던스가 변화하는데, 입력 임피던스를 자유공간의 고유 임피던스에 가까이 정합시켜서 전자파 흡수체를 설계할 수 있다. 전자파 흡수체의 입력 임피던스를 정합시키기 위해서는 전자기적 손실을 일으키는 재료를 사용해야 하며, 무손실(Lossless) 재료만으로 구성된 구조는 이러한 정합을 시킬 수 없다.

전자파 흡수 구조(Microwave Absorbing Structure)는 하중을 지지하는 구조 기능과 전자파를 흡수하는 흡수체 기능을 동시에 갖는 다기능 복합재료이다. Dallenbach 형태의 전자파 흡수 구조에 대한 기존의 연구들은 우수한 비강도와 비강성을 갖는 섬유 강화 복합재료에 CNT와 같은 전도성 재료나 페라이트(Ferrite) 계열의 자성 재료를 첨가하여 전자파 흡수 기능을 부여하여 왔다[3-7]. 하지만 복합재료의 기지에 이러한 물질을 첨가하는 경우 다양한 문제가 발생할 수 있다. 첨가 물질의 분산 상태에 따라 재료의 기계적 물성과 전자기적 물성이 변하게 되며, 복합재료의 성형 과정에서 가하는 압력과 같은 성형 조건에 따라서도 물성이 변하게 된다[8-10]. 일정한 함량의 첨가 물질을 기지에 분산하여 재료를 생산해도, 복합재료의 성형 과정에서 물성이 변할 수 있기 때문에 일정한 물성을 유지하며 복합재료를 제작하는데 어려움이 발생한다. 또한 첨가 물질로 인해 기지의 점도가 크게 증가하여 복합재료의 성형 작업이 용이하지 않고, 높은 섬유의 부피 분율(Fiber Volume Fraction)을 얻기 어려워지기 때문에 기계적 물성이 저하될 수 있다[4].

반면에 반도체 수준의 전기 전도도를 갖는 섬유 재료로 전자파 흡수 구조를 구현할 수 있다면 앞서 서술한 기존의 전자파 흡수 구조가 갖는 문제를 대부분 해결할 수 있을 것으로 기대된다. 유전체로 제작된 섬유를 전도성 물질로 코팅하는 방법이나 반도체 물질로 섬유의 제작하는 방법 등을 통해 반도체 섬유를 얻을 수 있으며, 이러한 섬유는 기존의 전자파 흡수체의 설계 방법을 동일하게 적용하여 전자파 흡수 구조를 구현해낼 수 있을 것으로 기대된다. 다양한 반도체 섬유로 사용되는 재료 중에서도 탄화규소는 반도체 세라믹 재료로, 좋은 전기적 물성과 기계적 물성을 가지고 있다. 탄화규소는 소결 과정에 따라 다양한 다형체를 가지기 때문에 탄화규소로 제조된 탄화규소 섬유도 다양한 전자기적 물성을 가질 수 있다.

본 연구에서는 두 종류의 반도체 섬유를 사용하여 복합재료를 제작하여 전자기적 물성을 측정하였고, 이를 활용하여 단층형 전자파 흡수 구조를 제작하고 그 흡수 성능을 측정하여 반도체 섬유 재료를 이용한 전자파 흡수 구조의

구현 가능성을 확인하였다. 또한, 복합재료를 이용하여 이층형 전자파 흡수 구조를 설계 및 제작하고 그 흡수 성능을 측정하여 반도체 섬유가 다층형 전자파 흡수 구조 제작에 있어 갖는 이점을 확인하였다.

2. 실험

2.1 복합재료 제작

본 연구에 사용된 반도체 섬유는 탄화규소 섬유로, UBE Industries, LTD에서 제조하여 평직(Plain Weave)으로 직조된 F-grade 섬유와 G-grade 섬유, 두 종류를 사용하였다. 복합재료의 기지 재료로는 3M AF126 에폭시 필름을 사용하였다. 두 종류의 섬유는 전자기적 손실을 일으킬 수 있는 물성을 갖는 섬유 중에서 임의로 선택되었으며, 에폭시 필름은 복합재료의 제작과정을 단순화하고 성능 분석을 수월하게 하기 위해 사용되었다.

에폭시 필름과 함께 적층된 복합재료는 오토클레이브(Autoclave)를 이용하여 경화하였다. 오토클레이브의 경화 곡선(Curing Cycle)은 Fig. 1과 같다. 이러한 방법으로 제작된 복합재료의 섬유 부피 분율(Fiber Volume Fraction)은 약 52.4%로 나타났다.

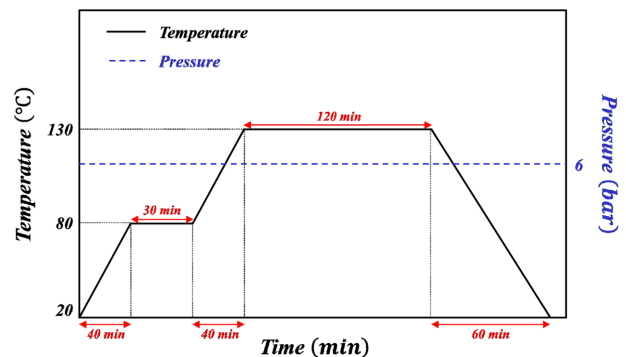


Fig. 1. Autoclave curing cycle

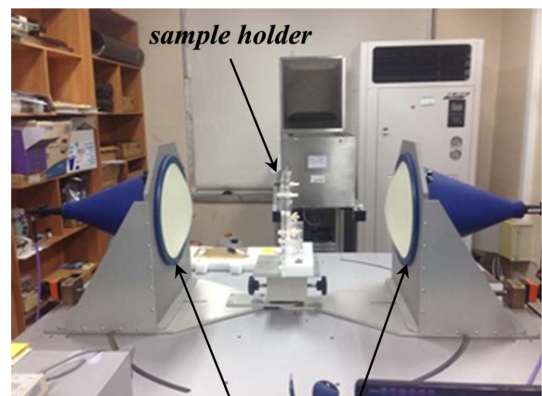


Fig. 2. Freespace measurement system

2.2 전자기적 물성의 측정

오토클레이브를 이용하여 제작한 복합재료의 전자기적 물성과 전자파 흡수 구조의 흡수 성능은 Fig. 2와 같은 자유공간 측정 장비(Freespace Measurement System)를 사용하여 측정하였다. 해당 장비는 혼 안테나에 렌즈가 부착되어 있어, 시편의 형상에 의해 발생하는 전자파 산란과 같이 오차를 발생시키는 요인을 최소화하여 신뢰도 높은 전자기적 물성을 측정 결과를 얻을 수 있다. 시편의 특정 크기를 요구하는 도파관을 사용하는 방법과 비교하여 자유공간 측정 방법은 일정 크기 이상의 시편만을 요구하며, 더 정확한 물성과 흡수 성능 측정 결과를 얻을 수 있다.

제작된 복합재료는 유전성 재료인 탄화규소와 에폭시로 구성되어 있기 때문에 복합재료의 투자율(Permeability)은 1로 가정하였으며, 복합재료의 X-band에서의 복소 유전율(Permittivity)을 측정하였다.

2.3 전자파 흡수 구조 설계

전자파 흡수 구조는 흡수층과 반사판으로 구성되어 있어, 전송선 이론(Transmission Line Theory)에 따라 Fig. 3과 같은 단락(Short)된 등가 회로(Equivalent Circuit)로 나타낼 수 있다. 여러 층으로 구성된 전자파 흡수 구조의 입력 임피던스는 다음과 같은 식으로 구할 수 있다.

$$Z_i = \eta_i \frac{Z_{i+1} + \eta_i \tanh(\gamma_i d_i)}{\eta_i + Z_{i+1} \tanh(\gamma_i d_i)}$$

$$\eta_i = \eta_0 \sqrt{\frac{1}{\epsilon_{r,i}}}, \quad \gamma_i = j2\pi \sqrt{\frac{\epsilon_{r,i}}{\lambda}}$$
(1)

위의 식 (1)에서 Z_i 는 i 번째 층의 입력 임피던스이며, η_0 는 자유공간의 특성 임피던스, d_i 는 i 번째 층의 두께, $\epsilon_{r,i}$ 는 i 번째 층의 상대 유전율을 의미한다. 위의 식으로 구한 입력 임피던스를 자유공간의 특성 임피던스에 가깝게 정합시키면 좋은 흡수 성능을 갖는 전자파 흡수 구조를 얻을 수 있다.

전자파 흡수 구조의 설계는 다양한 관점에서 최적화할 수 있다. 본 연구에서는 전자파 흡수 구조의 입력 임피던스를 자유공간의 특성 임피던스에 최대한 정합시킬 수 있는

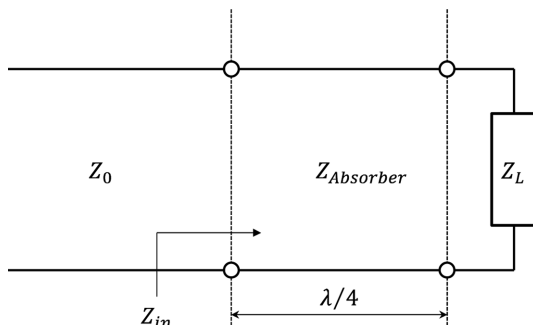


Fig. 3. Equivalent circuit of microwave absorber

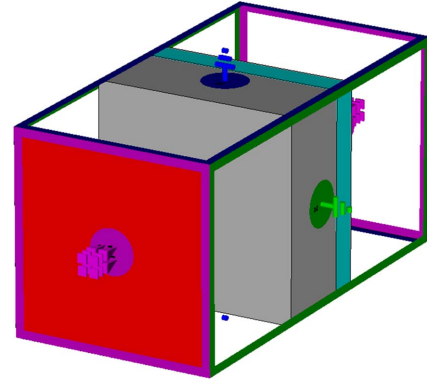


Fig. 4. Illustration of simulation model

각 층의 두께를 찾고, 그 설계에 가장 가깝게 제작할 수 있는 복합재료 설계를 결정하였다. 복합재료는 섬유의 한 장당 두께에 따라 제작할 수 있는 두께의 단위가 결정된다. 복합재료의 두께는 설계를 정밀하게 따라가지 못하고 불가피한 차이를 수반하게 되며, 이는 전자파 흡수 성능에 일정 수준의 오차를 야기할 수 있다. 이러한 문제점은 섬유 재료의 장당 두께를 설계 단계에서 반영하거나 장당 두께가 얇은 섬유 재료를 사용하여 어느 정도 보완할 수 있다.

2.4 시뮬레이션

설계된 전자파 흡수 구조는 상용 전자장 해석 프로그램인 CST를 사용하여 예상 흡수 성능을 계산하고 설계의 적절함의 여부를 판단하였다. Fig. 4는 CST 시뮬레이션 모델을 보여준다. 흡수 구조의 상부에서 전자파가 수직입사하며, 하부는 PEC 경계이다. 시뮬레이션 결과와 실제 제작한 전자파 흡수 성능을 비교하여 전자파 흡수 구조의 성능을 검증하였다.

3. 결 과

3.1 복소 유전율 및 Cole-Cole plot

유전율 측정을 위한 시편으로 F-grade 탄화규소 섬유를 사용한 F-SiC/epoxy와 G-grade 탄화규소 섬유를 사용한 G-SiC/epoxy를 제작하였다. 각 복합재료의 복소 유전율을 자유공간 측정 장비를 사용하여 측정하였다.

Fig. 5는 F-SiC/epoxy의 복소 유전율을 보여주며, Fig. 6는 G-SiC/epoxy의 복소 유전율을 보여준다. 10 GHz에서 F-SiC/epoxy의 복소 유전율은 $5.81-j2.04$ 로 측정되었으며, G-SiC/epoxy의 복소 유전율은 $8.09-j7.62$ 로 측정되었다.

3.2 단층형 전자파 흡수 구조

단층형 전자파 흡수 구조는 설계 변수가 적기 때문에 특정 유전율을 갖는 재료만 정합을 시킬 수 있다. 그 유전율은 식 (1)에서 λ/d 를 상수 c 로 가정하고 $Z_{in} = Z_0$ 를 정리한 식

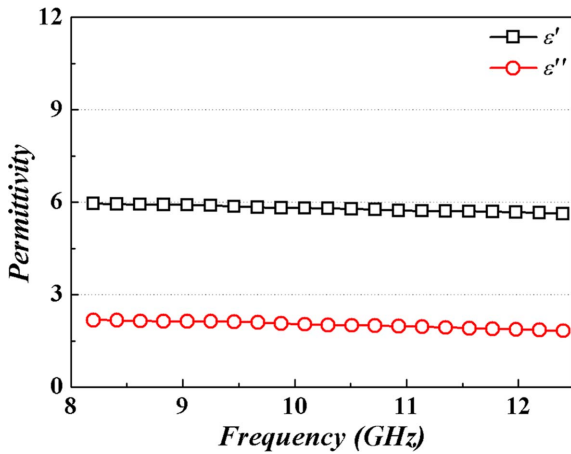


Fig. 5. Complex permittivity of F-SiC/epoxy

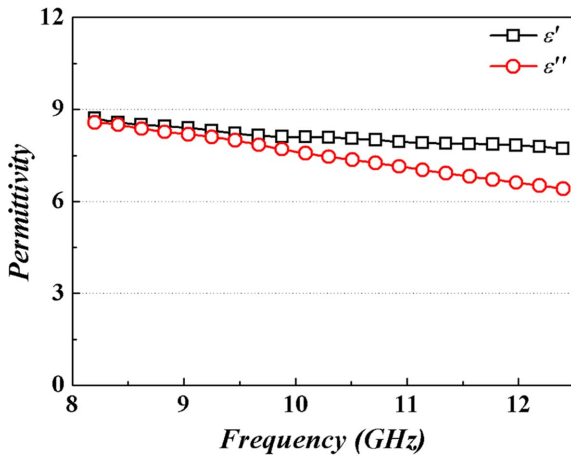


Fig. 6. Complex permittivity of G-SiC/epoxy

(2)의 해를 통해 구할 수 있다.

$$\sqrt{\frac{1}{\epsilon_r}} \tanh(j2\pi c \sqrt{\epsilon_r}) = 1 \quad (2)$$

식 (2)의 c 값에 따른 복소 유전율 ϵ_r 해는 c 값에 따라 복소 평면에 곡선으로 나타낼 수 있다. 이러한 곡선을 무반사 곡선이라 부른다. Fig. 7은 이러한 무반사 곡선과 10 GHz에서의 F-SiC/epoxy와 G-SiC/epoxy의 복소 유전율을 함께 나타낸 것이다. G-SiC/epoxy의 유전율은 무반사 곡선에서 많이 떨어져 있는 것을 볼 수 있는데, 이를 통해 이 재료로 제작한 단층형 흡수 구조는 좋은 성능을 갖는 설계를 얻기 어려우며, F-SiC/epoxy로 제작한 흡수 구조는 보다 더 나은 성능을 가질 것으로 예상할 수 있다.

기존의 기능성 물질을 첨가하여 제작하는 흡수 구조는 기능성 물질의 첨가량을 통해 재료의 유전율을 조절할 수 있어 단층형 흡수 구조로 최적화할 수 있으나, 반도체 섬유로 제작하는 복합재의 유전율은 조절하기 어려워 높은 흡수 성능을 갖는 흡수 구조를 얻기에는 어려움이 있다. Fig.

8과 Fig. 9는 이러한 단층형 흡수 구조의 한계를 보여준다. 재료의 두께를 최적화해도 특정 주파수에서 가질 수 있는 최대 흡수 성능에는 한계가 있다. F-SiC/epoxy의 10 GHz에서의 최대 흡수 성능은 -15.4 dB이며, G-SiC/epoxy는 -9.2 dB이다.

Fig. 10과 Fig. 11은 제작된 전자파 흡수 구조의 성능 측정 결과를 보여준다. 시뮬레이션과 실제 측정 결과가 대체로

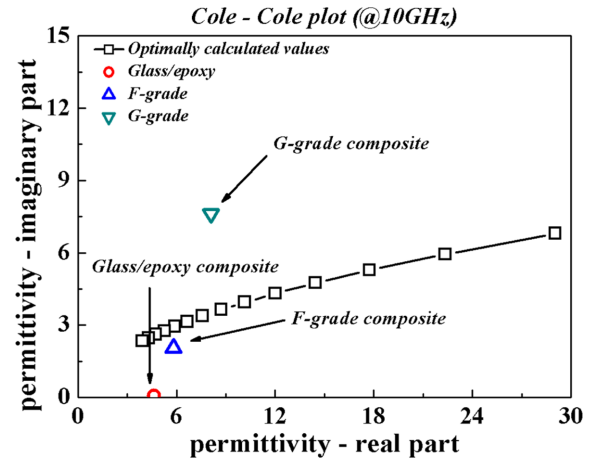


Fig. 7. Cole-cole plot for single slab absorber

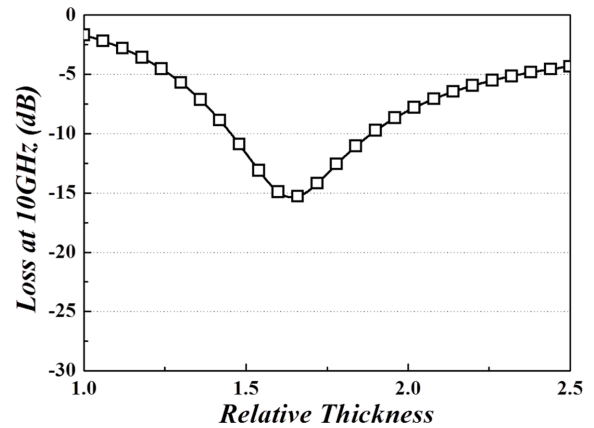


Fig. 8. Optimal loss for F-SiC/epoxy single slab absorber

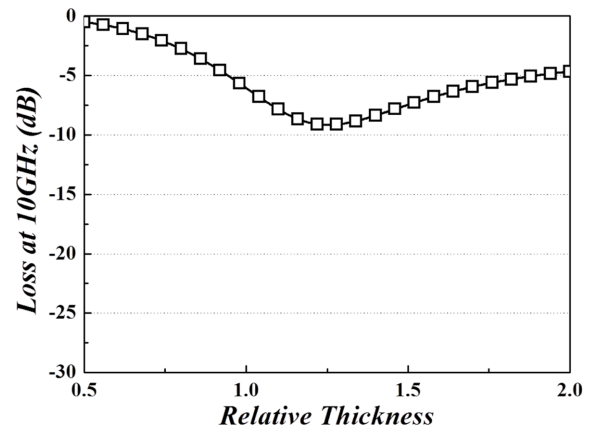


Fig. 9. Optimal loss for G-SiC/epoxy single slab absorber

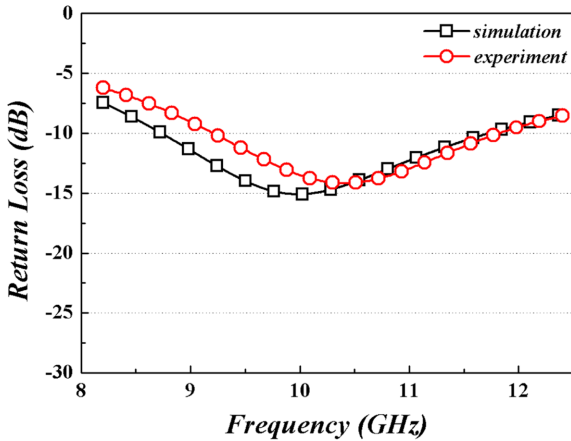


Fig. 10. Measurement of F-SiC/epoxy single slab absorber

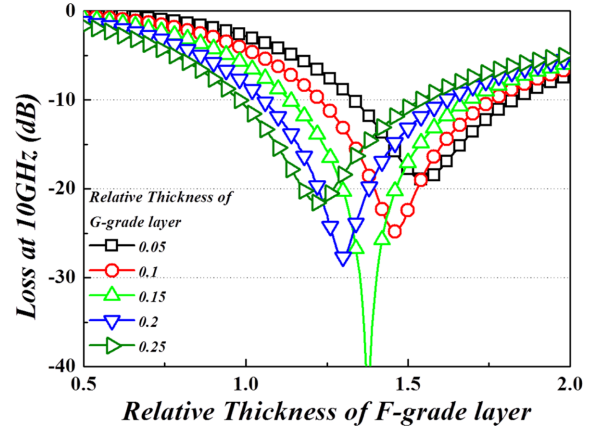


Fig. 12. Measurement of G-SiC/epoxy single slab absorber

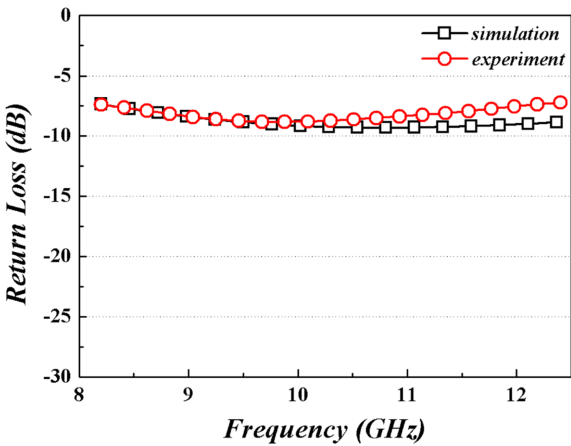


Fig. 11. Measurement of G-SiC/epoxy single slab absorber

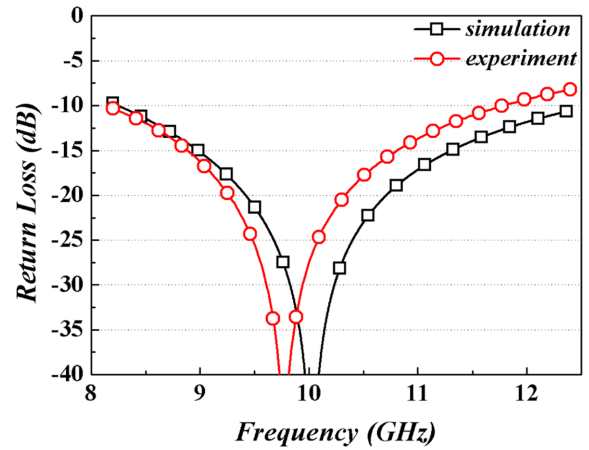


Fig. 13. Measurement of double slab absorber

잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 설계 두께와 실제 제작된 복합재료의 두께에 차이가 발생하여 흡수 성능 중심 주파수가 약간 이동한 것이 관찰되었다. F-SiC/epoxy의 최대 흡수 성능은 10.4 GHz에서 -14.2 dB로 측정되었고, G-SiC/epoxy의 최대 흡수 성능은 9.8 GHz에서 -8.8 dB로 측정되었다.

3.3 이중형 전자파 흡수 구조

앞서 살펴본 바와 같이 반도체 섬유를 사용하는 전자파 흡수 구조는 일반적으로 좋은 흡수 성능을 갖는 단층형 흡수 구조를 얻기 어렵기 때문에 다층형 흡수 구조를 구성하여 그러한 단점을 보완하는 것이 유리하다. 단일 주파수를 표적으로 하는 가장 간단한 전자파 흡수 구조는 이중형 흡수 구조이며, 서로 다른 전자기적 물성을 갖는 두 가지 재료로 구성한다. 두 재료의 배치 순서에 따라 두 종류의 구조를 설계할 수 있다. F-SiC/epoxy와 G-SiC/epoxy를 사용하여 두 가지 설계를 진행하였으며, 두 흡수 구조가 실제로 제작되었을 때 복합재료의 직물 한 층당 두께로 인해 설계된 흡수 구조의 최적 두께와 오차가 발생하기 때문에 이러한

더 오차가 적을 것으로 예상되는 설계를 선택하였다. 최종 설계된 흡수 구조는 G-SiC/epoxy, F-SiC/epoxy, 그리고 PEC 순으로 적층되는 구조이며, Fig. 12는 흡수 구조를 구성하는 각 층의 상대적인 두께의 변화에 따른 10 GHz에서의 흡수 성능을 보여준다. 각 층의 두께의 변화에 따라 흡수 성능이 지속적으로 변하는 것을 볼 수 있는데, 이중형 흡수 구조는 설계 변수가 많아진 만큼 흡수 성능의 변동 요인이 많아져서 오차가 커지기 쉬움을 시사한다.

제작된 이중형 전자파 흡수 구조의 측정 결과는 Fig. 13과 같다. 전자파 흡수 구조의 최대 흡수 성능은 9.8 GHz에서 -43.9 dB로 측정되었다. 설계 단계에서 두께가 최적화된 다층형 흡수 구조는 표적 주파수에서 입력 임피던스가 정합되어 전자파의 반사가 거의 없다. 하지만 다층형 흡수 구조는 설계 변수가 많아져서 각 층에서 오차가 발생할 수 있기 때문에 흡수 성능과 중심 주파수의 변화할 수 있는 범위가 더 넓어진다. 두께에 의한 오차 요인은 설계 과정에서 고려되지 않고 복합재료의 특성상 발생할 수 밖에 없기 때문에 실제 제작되는 흡수 구조는 일정 수준의 오차를 갖게 된다. 두께에 의한 오차는 각 층의 섬유 적층 수를 조절해가

며 설계 변수에 대한 추가적인 실험을 통해 어느 정도 보완할 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 반도체 섬유 강화 복합재료를 이용하여 전자파 흡수 구조를 제작하였다. 섬유 재료는 두 종류의 탄화규소 섬유를 사용하였고, 기지 재료로는 에폭시를 사용하였다. 각 섬유로 복합재료를 제작하여 자유공간 측정 장비로 X-band에서의 복소 유전율을 측정하였다. 측정된 유전율을 전송선 이론에 적용하여 단층형 흡수 구조와 이중층형 흡수 구조를 설계하고 제작하여 그 흡수 성능을 측정하여 시뮬레이션 결과와 비교하였다. F-SiC/epoxy의 경우 유전율이 무반사 곡선에 비교적 가까워서 -14.2 dB의 흡수 성능을 보였고, G-SiC/epoxy의 유전율은 무반사 곡선에서 멀리 떨어져 있어서 흡수 구조는 -8.8 dB의 상대적으로 낮은 흡수 성능을 보였다. 두 재료는 단층형 흡수 구조 설계에 적합하지 않았기 때문에 두 재료를 함께 사용하여 이중층 전자파 흡수 구조를 제작하였다. 제작된 이중층 전자파 흡수 구조는 -43.9 dB의 좋은 흡수 성능을 보였다. 이중층 전자파 흡수 구조는 설계 변수가 많은 특성상 오차가 상대적으로 크게 발생하여 흡수 성능과 시뮬레이션에서 차이가 어느 정도 보였다. 하지만 기존의 연구들에서와 같이 기능성 입자를 첨가하는 흡수체는 앞서 서술한 것과 같은 이유로 발생하는 물성의 불안정함으로 인해 그 흡수 성능이 -30 dB를 넘는 흡수체를 얻기 어렵지만[8-11], 반도체 섬유 강화 복합재료를 제작한 전자파 흡수 구조는 오차에도 불구하고 -43.9 dB의 높은 흡수 성능을 보였다.

반도체 섬유 강화 복합재료를 제작한 전자파 흡수 구조는 기존의 기능성 물질을 첨가하는 전자파 흡수 구조에 비해 제작 과정이 많이 단순하면서 오차가 발생하는 요인이 상대적으로 적다. 또한 섬유 구조는 높은 흡수 성능을 갖는 다층형 전자파 흡수 구조를 제작하기에 유리하다는 결론을 얻을 수 있었다.

후 기

본 연구는 (방위사업청과) 국방과학연구소(계약번호 UD130045JD)의 연구비 지원에 의한 기초연구프로그램의 연구 결과임.

REFERENCES

1. Vinoy, K.J., and Jha, R.M., *Radar Absorbing Materials From Theory to Design and Characterization*, Kluwer Academic Publishers, Norwell, US, 1996.
2. Rozanov, K.N., "Ultimate Thickness to Bandwidth Ratio of Radar Absorbers", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 48, No. 8, 2000, pp. 1230-1234.
3. Kim, J.B., "Broadband Radar Absorbing Structures of Carbon Nanocomposites", *Advanced Composite Materials*, Vol. 21, No. 4, 2012, pp. 333-344.
4. Shin, J.H., Jang, H.K., Choi, W.H., Song, T.H., Kim, C.G., and Lee, W.Y., "Design and Verification of a Single Slab RAS Through Mass Production of Glass/MWNT Added Epoxy Composite Prepreg", *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 132, 42019, 2015, pp. 1-9.
5. Zou, H., Li, S., Zhang, L., Yan, S., Wu, H., Zhang, S., and Tian, M., "Determining Factors for High Performance Silicone Rubber Microwave Absorbing Materials", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 323, 2011, pp. 1643-1651.
6. Feng, Y., and Qui, T., "Preparation, Characterization and Microwave Absorbing Properties of FeNi Alloy Prepared by Gas Atomization Method", *Journal of Alloys and Compounds*, 513, 2012, pp. 455-459.
7. Park, K.Y., Han, J.H., Kim, J.B., and Lee, S.K., "Two-layered Electromagnetic Wave-absorbing E-glass/epoxy Plain Weave Composites Containing Car Nanofibers and NiFe Particles", *Journal of Composite Materials*, Vol. 45, No. 26, 2011, pp. 2773-2781.
8. Song, Y.S., and Youn, J.R., "Influence of Dispersion States of Carbon Nanocomposites", *Carbon*, Vol. 43, 2005, pp. 1378-1385.
9. Shin, J.H., Jang, H.K., Choi, W.H., Song, T.H., Kim, C.G., and Lee, W.Y., "Numerical Analysis of the Complex Permittivity of MWNT added Epoxy Depending on Agglomeration Size", Vol. 27, No. 5, 2014, pp. 190-195.
10. Song, T.H., Choi, W.H., Shin, J.H., Kim, C.G., and Koo, B.U., "A Study on the Permittivity Change with Respect to Curing Cycle of Composites", *Proceeding of the 2013 Conference of the Korea Institute of Military Science and Technology*, Jeju, Korea, Jul. 2013, pp. 711-712.
11. Shin, J.H., *Manufacture of RAS for Flight Vehicle with the Consideration of Various Environmental Conditions*, Ph.D Thesis, KAIST, Korea, 2015.