

카본블랙이 첨가된 유리직물 복합재 샌드위치 구조의 전자기적 특성

박기연*, 이상의*, 강래형*, 한재흥**, 김천곤**, 이인**

Electromagnetic Characteristics of Carbon Black filled Glass-Fabric Composite Sandwich Structure

Ki-Yeon Park, Sang-Eui Lee, Lae-hyong Kang, Jae-hung Han, Chun-Gon Kim and In Lee

Key Words : X-band(8.2~12.4GHz), RAS(Radar Absorbing Structures), reflection loss

ABSTRACT

The absorption and the interference shielding of the electromagnetic wave problem have been a very important issue for commercial and military purposes. This study dealt with the simulation reflection loss for electromagnetic absorbing sandwich type structures in X-band(8.2GHz~12.4GHz). Glass/epoxy composites containing conductive carbon blacks were used for the face sheets and styrofoams were used for the core. Their permittivities in X-band were measured using the transmission line technique. Simulation results of 3-layered sandwich type structures showed the reflection loss using the theory about transmission and reflection in a multi-layered medium.

1. 서론

최근 들어 전자 장비의 사용이 급증하면서 전자파 상호 간섭에 의한 여러 가지 문제들이 발생하였고, 전자파 차폐 및 EMI(Electromagnetic Interference) 대책에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 예를 들면, 레이더에 포착되지 않도록 만들어진 비행기인 스텔스기(stealth aircraft)를 들 수 있다. 전자파 흡수 물질(RAM: Radar Absorbing Materials)에 관한 연구는 국내의 경우는 미흡한 상태이며, 외국의 경우 오래 전부터 수행되어 성과를 얻었다.

적의 레이더가 발생시키는 전자파를 흡수 또는 산란시켜 포착되지 않도록 하는 기술이 스텔스 기술들 중 가장 중요하다. 이러한 전자파에 대한 스텔스 기술은 입사하는 전자파를 레이더의 방향이

아닌 다른 방향으로 산란시키는 반사파 감소 형상화(shaping) 방법과 입사하는 전자파를 흡수 또는 간섭을 통해 소멸시키는 전자파 흡수 재료(material)를 사용하는 방법으로 크게 분류된다. 형상화에 의한 방법이 비중이 크지만 형상화만으로는 100%의 은폐를 할 수 없고, 이를 보완하기 위하여 전자파 흡수 재료의 개발은 스텔스 성능 구현을 위하여 반드시 필요한 분야이다[1].

샌드위치 형태의 전자기파 흡수체에 대한 실례로는 스웨덴 Kockums 사에서 제작한 Visby Class corvette 해군 군함을 들 수 있다. 이 군함의 덮개(hull)로는 샌드위치 구조의 복합재료를 사용하였다. 심재(core)로는 탄소섬유(carbon fiber)를 포함한 PVC(PolyVinyl Chloride)를 사용하였고, 면재(face sheet)로는 비닐 에스테르 수지(vinyl ester resin)를 이용한 층들을 사용하였다. 그 외에도 항공기의 엔진 흡입구와 배기장치와 같은 레이더파 감소가 요구되어지는 모든 구조체에서 사용될 수 있다.

본 연구에서는 X-band 대역에서의 샌드위치 구조를 갖는 전파 흡수체의 반사손실 특성에 대해

* 한국과학기술원 항공우주공학전공 대학원

** 한국과학기술원 항공우주공학전공

살펴보았다. 면재로는 glass fabric/epoxy 복합재료에 유전 손실재료인 카본블랙을 에폭시 기지와 함께 혼합하여 제작하고 유전을 데이터로 확보하였다. 심재로는 스티로폼(styrofoam)을 선택하였고 마찬가지로 유전을 데이터로 확보하였다. 여기서 얻은 유전을 데이터를 이용하여 샌드위치 형태를 갖는 다층평판에 대한 중심주파수 10GHz에서의 반사손실을 시뮬레이션하였다.

2. 이론적 배경

2.1 반사계수 및 반사손실

균일 평면파가 매질 1(임피던스 η_1)에서 매질 2(임피던스 η_2)의 경계면에 수직 입사할 때, 입사파와 반사파의 비를 반사계수(Γ)라 한다(식 (1)). Γ 는 크기와 위상을 갖는 벡터량으로, 위상은 변하지만 크기는 일정하고, 0에서 1 이하의 값을 가진다. 반사전력과 입사전력의 비를 나타내는 반사손실(reflection loss)은 식 (2)와 같다[2].

$$\Gamma = \frac{\overline{E}_r}{\overline{E}_i} = |\Gamma| e^{j\theta} = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1} \quad (1)$$

$$RL = 10 \log \frac{P_r}{P_i} = 10 \log \frac{|\overline{E}_r|^2}{|\overline{E}_i|^2} = 20 \log \rho \quad (2)$$

2.2 전파 흡수체의 원리

Fig. 1은 단층형 전파흡수체를 나타내고 있다. 전자기파가 흡수체에 도달하였을 때, 무반사로 파가 모두 흡수되는 조건은 입력 임피던스(Z_{in})가 공기의 임피던스(Z_a)와 일치하는 경우(임피던스 정합: impedance matching)이다. 전송선로상에서 거리 d 인 지점인 부하에 걸리는 입력 임피던스는 $Z_{in} = Z_0 \frac{Z_d + Z_0 \tanh \gamma d}{Z_0 + Z_d \tanh \gamma d}$ 이다. Fig. 1에서 새로운 매질 흡수체의 임피던스는 $Z_0 = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = \sqrt{\frac{\mu_r \mu_0}{\epsilon_r \epsilon_0}}$ (흡수체)와 같고, 시료의 두께 d 인 지점은 도체 평판이며 걸리는 부하는 단락(short)된 경우이므로 $Z_d = 0$ 이 된다. 따라서 입력 임피던스는 $Z_{in} = Z_0 \tanh \gamma d$ 이다. 임피던스 정합상태는 $Z_{in} = Z_a$ 인 조건이므로 정리하면 식 (3)과 같다[2, 3].

$$1 = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tanh(j \frac{2\pi \gamma d}{c} \sqrt{\mu_r \epsilon_r}) \quad (3)$$

$$Z_a = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \text{ (진공)}, \quad \gamma = j\omega\sqrt{\mu\epsilon} \text{ (전파상수)}, \quad c = 1/\sqrt{\mu_0\epsilon_0} \text{ (광속)}$$

다층 구조를 고려할 경우 중간 매질들 간에 다중반사가 일어나지만 다층 전체에 대한 유효입력 임피던스를 구해내면 단층의 경우와 동일하다.

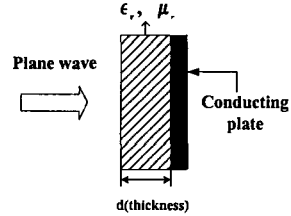


Fig. 1 Radar absorbing structure.

2.3 평판형 다층 구조에서 투과와 반사이론

일반적으로 N 층형 평면 매질(Fig. 2)에서 region i 와 region $i+1$ 사이의 경계에서 일반 반사계수 $\tilde{R}_{i,i+1}$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\tilde{R}_{i,i+1} = \frac{R_{i,i+1} + \tilde{R}_{i+1,i+2} e^{2jk_{i+1,z}(d_{i+1}-d_i)}}{1 + R_{i,i+1} \tilde{R}_{i+1,i+2} e^{2jk_{i+1,z}(d_{i+1}-d_i)}} \quad (4)$$

맨 뒷층이 금속과 같은 완전도체(perfect electric conductor)인 경우에는 $\tilde{R} = -1$ 을 대입하여 순차적으로 젤 위층에서의 일반 반사계수 \tilde{R}_{i2} 를 구할 수 있다[4].

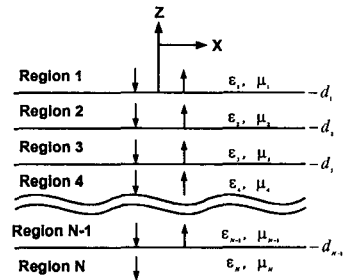


Fig.2 Reflection and transmission in a multi-layered medium.

3. 면재 제작 및 전자기적 물성 측정

3.1 면재용 시편 제작

손실재료로는 유전 손실재인 카본블랙(carbon black)을 흡수 첨가제로 사용하였다. 본 실험에 사용된 카본블랙은 상업화된 전도성 카본블랙인 Vulcan XC-72(Cobot사 제품)이다. 비중은 1.8이고 입경은 27nm이다. 프리프레그(prepreg)는 ㈜한국화

이바에서 제작한 glass fabric/epoxy Prepreg K618이다. 카본블랙을 무게비로 0 wt%, 5 wt%, 6 wt%, 7 wt%, 8 wt%의 경우의 시편에 대해서 제작하였다. 편의상 각각의 시편은 CB0, CB5, CB6, CB7, CB8로 표기하였다. 이렇게 제작된 시료를 압력 3atm, 온도 80 °C 에서 30분 130 °C 에서 90분 동안 오토클레이브(autoclave)에서 경화시켜 제작하였다.

3.2 면재와 심재의 전자기적 물성 측정

위에서 제작한 면재용 시편을 X-band 용 직사각형 도파관(WR-90) 규격(22.86×10.16mm)의 크기로 가공한 후 회로 분석기(network analyzer) HP 8722ES 와 도파관을 사용하여 S-parameter 를 측정하였다. Fig. 3 은 측정 실험의 모형을 나타낸다.

카본블랙을 함유한 복합재료의 경우에는 유전손실재를 사용한 경우이며, 비자성체이기 때문에 투자율은 공기의 비투자율인 1 을 사용하였고, 식 (5)와 (6)에서 S_{21} 으로 유전율을 계산하였다[5]. 스티로폼에도 동일한 방식을 적용하였다.

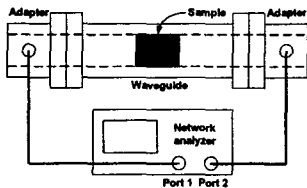


Fig. 3 S-parameter measurement system diagram.

$$S_{21} = \frac{2p}{(1+p^2)\sinh(\beta\beta_0lp) + 2p\cosh(\beta\beta_0lp)} \quad (5)$$

$$p = \frac{\sqrt{\left(\frac{2\pi f}{c}\right)^2 \epsilon' - \left(\frac{\pi}{a}\right)^2}}{\sqrt{\left(\frac{2\pi f}{c}\right)^2 - \left(\frac{\pi}{a}\right)^2}} \quad (6)$$

면재의 유전율을 계산한 결과는 Fig. 4, Fig. 5 와 같다. 카본블랙의 함량이 증가함에 따라 유전율의 실수부와 허수부는 증가하는 경향을 나타내고 있다. 허수항의 증가분 정도는 CB5 이상이 되면서 두드러짐을 알 수 있다.

심재로 사용할 스티로폼의 유전율 계산결과는 Fig. 6 과 같다. 입자가 굵고 밀도가 작은 스티로폼을 A 로, 입자가 가늘고 밀도가 큰 스티로폼을 B 로 두었다. 실수항의 결과를 살펴보면, A 의 경우 거의 공기층과 비슷한 1 의 결과를 얻었고, B 의 경우 공기의 유전율보다 약간 높은 1.2~1.3 정도를 나타내었다. 두 경우 모두 손실재가 아니기 때문에 허수항은 0 의 결과를 나타내고 있다.

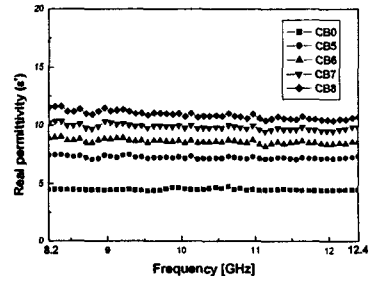


Fig. 4 Real part of permittivity with carbon black content.

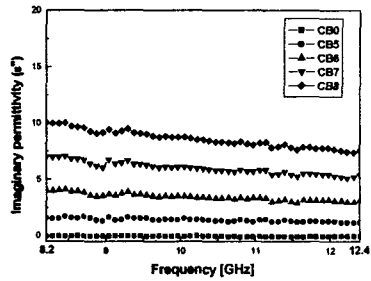


Fig.5 Imaginary part of permittivity with carbon black content.

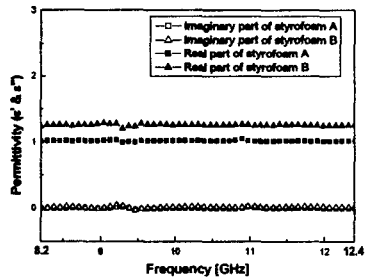


Fig. 6 Permittivity for styrofoams.

4. 샌드위치 형태의 다층구조 시뮬레이션

본 연구에서는 X-band 대역에서의 샌드위치 다층구조에 대한 반사손실을 시뮬레이션하였다. 면재로는 CB5, CB6, CB7, CB8 을 사용하였고, 심재로는 스티로폼 A, B 를 사용하였다. CB0 는 유전율 허수항들이 0 이기 때문에 유전 손실재로는 부적절하여 생략하였다. 다층구조에서의 투과와 반사에 관한 수식[4]들을 MATLAB 를 사용하여 프로그램을 작성하고 반사손실에 대한 경향을 살펴보았다. 전파흡수체는 입사한 파가 마지막 경계면을 투과하지 않아야 하므로, 맨 뒷 층의 경계조건은 전기전도도가 $10^4 \Omega m$ 이고 반사계수가 0.9895 로 도체와 같은 특성[1]을 나타내는 carbon fabric/epoxy 복합재료(CFRP)로 가정하였다. 층별 순서와 두께에 대한 다양한 변화를 주면서 중심 주파수 10GHz 기준으로 반사손실 특성이 우수한 4 가지 경우에 대한 결과를 나타내 보았다.

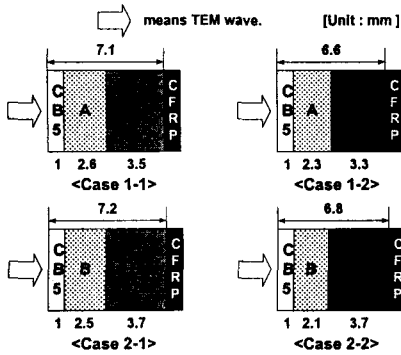


Fig. 7 Layer sequence and thickness of simulation models.

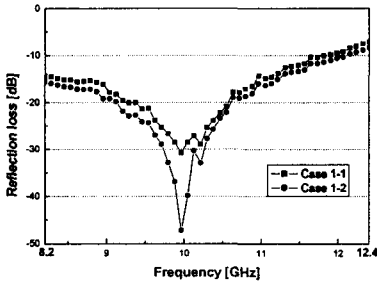


Fig. 8 Reflection loss for case 1.

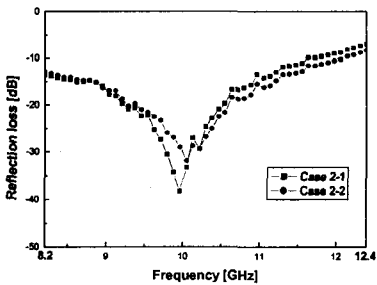


Fig. 9 Reflection loss for case 2.

4.1 3층형 샌드위치 구조의 시뮬레이션

면재인 첫 번째 층은 공기층에 의한 반사량을 줄이기 위해 유전손실이 작은 CB5를 사용하였으며, 심재로서 두 번째 층은 스티로폼 A와 B를 사용하였고, 면재인 마지막 층은 금속 층인 경계면과의 반사를 줄이기 위해 손실이 큰 CB7과 CB8을 사용하였다.

Fig. 7은 샌드위치 구조의 적층 순서 및 두께를 나타내고 있다. Fig. 8, Fig. 9는 각 경우에 대한 반사손실 그래프를 나타내고 있다. 전반적인 경향은 X-band 전범위에 걸쳐 우수한 흡수성을 보여주고 있으며, 정합두께는 6.6~7.2mm의 분포를 보였다. Case 1과 2의 차이는 심재로 스티로폼 A와 B를 사용한 경우이다. 공기층과 거의 흡사한 특성을 나타내는 A의 경우가 정합두께가 약간 얇았으며 흡수대역은 비슷한 분포를 나타내었다. 각 경

우의 소번호는 경계면 바로 앞의 마지막 층으로 CB7을 사용한 것과 CB8을 사용한 것에 대한 분류를 나타낸다. CB8을 사용한 경우가 CB7을 사용한 경우보다 흡수대역이 약간 넓은 범위를 가졌으며, 정합두께도 얇은 특성을 나타내었다.

5. 결론

본 연구는 X-band 대역에서의 샌드위치 형태를 갖는 전파흡수체의 반사손실 특성에 대해 살펴보았다. 면재로는 glass fabric/epoxy 복합재료에 카본블랙을 혼합한 형태의 흡수체와 심재로는 스티로폼을 사용하였다. 이들의 X-band 대역에서의 유전율을 데이터를 확보하였고, 이 데이터를 사용하여 3층형 샌드위치 구조에 대한 반사손실 특성을 시뮬레이션하여 성능이 우수한 4 가지의 경우에 대한 결과를 나타내었다. 정합두께가 6.6~7.2mm 분포를 보였고, 3.5GHz 이상의 10dB 흡수대역과 1.2GHz 이상의 20dB 흡수대역을 가지는 것으로 나타났다.

향후 폼 코어 구조로 약간의 유전 손실을 갖는 심재를 사용하여 유전율을 측정하고 시뮬레이션을 실행하여 정합두께를 줄이는 등의 새로운 정합 특성에 관한 연구를 수행할 계획이다. 설계인자 연구(parametric study)를 수행하여 체계적인 흡수체 설계를 목표로 하고 있다. 이를 바탕으로 설계한 모델을 제작하여 TEM 모드에서의 반사손실을 측정하고 예측결과와 비교함으로써 샌드위치 형태의 전파흡수체를 제시하고자 한다.

후기

이 연구(논문)는 과학기술부 지원으로 수행하는 21세기 프론티어 연구사업(스마트무인기기술개발)의 일환으로 수행되었습니다

참고문헌

- (1) 오정훈, "복합재 적층판을 이용한 전자기파 흡수 구조체의 설계," 박사학위논문, 한국과학기술원, 2003.
- (2) William H.Hayt and Jr. John A. Buck, *Engineering Electromagnetics*, 6th edition, McGraw-Hill, 2001.
- (3) D.I. Kim, S.M. Chung, Y.S. Ahn, "A Study on Measuring Technique of Characteristics for Electromagnetic Wave of Microwave Absorbers", *Journal of the Korean Institute of Navigation*, Vol 16, 1992, pp. 25-34.
- (4) Weng Cho Chew, *Waves and Fields in Inhomogeneous Media*, Van Nostrand Reinhold, 1990.
- (5) 이호선, "두 개의 평판이 붙어있는 유전체 코팅 원통의 RCS 측정," 석사학위논문, 한국과학기술원, 2002.