

샌드위치 구조의 전자기파 흡수체 제작 및 전자기적 특성

박기연* · 이상의* · 한재흥** · 김천곤** · 이 인**

Fabrication and Electromagnetic Characteristics of Electromagnetic Wave Absorbing Sandwich Structures

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

Key Words : X-band(8.2~12.4GHz) frequencies, Permittivities, RAS(Radar Absorbing Structures), Sandwich structures, Reflection loss

ABSTRACT

The object of this study is to design the Radar Absorbing Structures (RAS) having sandwich structures in the X-band (8.2~12.4GHz) frequencies. Glass fabric/epoxy composites containing conductive carbon blacks and carbon fabric/epoxy composites were used for the face sheets. Polyurethane (PU) foams containing multi-walled carbon nanotube (MWNT) were used for the core. Their permittivities in the X-band were measured using the transmission line technique. The reflection loss characteristics for multi-layered sandwich structures were calculated using the theory of transmission and reflection in a multi-layered medium. Three kinds of specimens were fabricated and their reflection losses in the X-band were measured using the free space technique. Experimental results were in good agreements with simulated ones in 10 dB absorbing bandwidth.

1. 서 론

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. 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 분류된다. 형상화에 의한 방법이 비중에 크지만 형상화만으로는 100%의 은폐를 할 수 없고, 이를 보완하기 위하여 전자파 흡수 재료의 개발은 스텔스 성능

구현을 위해 반드시 필요한 분야이다[1, 2].

샌드위치 형태의 전자기파 흡수체에 대한 실례로는 스웨덴 Kockums 사에서 제작한 Visby Class corvette 해군 군함을 들 수 있다. 또한 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 살펴보았다. 면재로는 전도성의 카본블랙을 함유한 유리직물/에폭시 복합재료와 카본직물/에폭시 복합재료를 사용하였다. 심재로는 다중벽의 탄소 나노튜브를 함유한 폴리우레탄 폼을 사용하였다. 전송선법을 이용하여 이들의 X-band 에서의 유전율 데이터를 확보하였다. 다층구조의 투과와 반사 이론을 사용하여, 샌드위치 구조에서의 반사손실 특성을 시뮬레이션을 통해 살펴보았고, 세 가지 종류의 모델을 선택하고 제작하였다. 또한 이들의 X-band 에서의 반사손실을 자유공간 기법을 사용하여 측정하였으며, 이들의 반사손실에 대한 예측 결과와 측정실험 결과를 비교해 보았다.

* 한국과학기술원 항공우주공학전공 대학원

** 한국과학기술원 항공우주공학전공

2. 흡수재 제작 및 전자기적 물성 측정

2.1 샌드위치 구조의 특성

일반적으로 샌드위치 구조는 두 개의 면재 사이에 심재를 둔 형태를 지니고, 주요 특징으로는 평면 내의(in-plane) 하중과 굽힘(bending) 하중에 대한 지지 능력이 우수하다. 본 연구에서는 면재로는 유리직물/에폭시 복합재료와 카본직물/에폭시 복합재료를 사용하였고, 심재로는 폴리우레탄 폼을 사용하였다(Fig. 1).

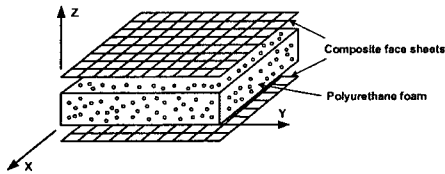


Fig. 1 Sandwich construction with composite face sheets and foam core.

2.2 면재용 시편 제작

손실재료로는 유전 손실재인 카본블랙(carbon black)을 흡수 첨가재로 사용하였다. 본 실험에 사용된 카본블랙은 상업화된 전도성 카본블랙인 Vulcan XC-72(Cobot 사 제품)이다. 비중은 1.8 이고 입경은 27nm 이다. 프리프레그(prepreg)는 ㈜한국화이바에서 제작한 glass fabric/epoxy Prepreg K618 이다. Glass fabric/epoxy 에 카본블랙을 무게비로 0 wt%, 5 wt%, 6 wt%, 7 wt %, 8 wt% 의 경우의 시편에 대해서 제작하였다. 편의상 각각의 시편은 CB0, CB5, CB6, CB7, CB8 로 표기하였다. 이렇게 제작된 시료를 압력 3atm, 온도 80°C 에서 30 분 130°C 에서 90 분 동안 오토클레이브(autoclave)에서 경화시켜 제작하였다. 면재의 경계 조건인 마지막 한쪽 면은 전반사를 일으키는 차폐면으로, ㈜한국화이바에서 제작한 carbon fabric/epoxy Prepreg CF3327 EPC 를 사용하였다. 전기전도도가 $10^4 S/m$ 이고, 반사계수가 0.9895 로 도체와 같은 특성을 나타내기 때문이다. 성형 사이클은 압력 1.2atm, 온도 80°C 에서 30 분, 압력 7atm, 130°C 에서 2 시간 동안 오토클레이브로 경화시켜 제작하였다.

2.3 심재용 폼 제작

본 연구에서는 ㈜한국바스프에서 생산된 원료들을 이용하여 경질의 폴리우레탄 폼을 제조하였다. 심재로서 폼을 선택한 이유는 허니콤 심재의 경우에는 전자기파에 대하여 이방성의 특성을 나타내기 때문에 등방성 특성을 나타내는 폼 심재를 사

용하였다. 심재를 중심으로 대칭 형태의 면재를 갖는 샌드위치 흡수체를 만들기 위해서는 심재의 유전손실이 존재해야 어느 정도 성능이 나타나기 때문에 MWNT 를 첨가한 폼을 제조하였다. 사용한 MWNT 는 ㈜일진나노텍 제품으로 제품명은 CVD MWNT95 이며, 직경은 10~20nm 이고 비표면적(specific surface area)은 $200 m^2/g$ 이다. 심재용 폼의 제조 과정은 Fig. 2 와 같다. 폼의 유전 손실정도를 높여주기 위해서 MDI 용액에 MWNT 를 전체 질량에 대한 무게비로 0 wt%, 3 wt%, 5 wt% 로 섞어서 분산시킨 후 폴리우레탄 폼을 만들었다. 편의상 Foam A, Foam B, Foam C 로 표기하였다.

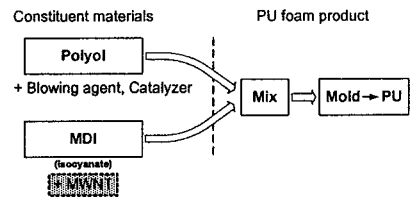


Fig. 2 PU foam processing procedure.

2.4 면재와 심재의 전자기적 물성 측정

제작한 면재용 시편을 X-band 용 직사각형 도파관(WR-90) 규격($22.86 \times 10.16mm$)의 크기로 가공한 후 회로 분석기(network analyzer) HP 8722ES 와 도파관을 사용하여 S-parameter 를 측정하였다. S_{21} 의 크기와 위상을 이용하여 유전율을 계산하였다[3]. 카본블랙의 함량이 증가함에 따라 유전율의 실수부와 허수부는 증가하는 경향을 보이고 있다(Fig. 3, Fig. 4). CB0 의 경우에는 유전 손실재인 카본블랙을 첨가하지 않았기 때문에 허수항은 0 을 나타내고 있으며, 시료들의 허수항의 증가분 정도는 CB5 이상이 되면서 두드러짐을 알 수 있다.

심재로 사용할 폴리우레탄 폼의 물성을 측정하였다. 위와 동일한 방식으로 유전율을 계산하였다. 폴리우레탄 폼은 원재료들의 조합에 따라서 연질 폼에서 경질폼, 발포폼에서 무발포폼의 형태로 제작할 수 있다. 본 연구에서는 무발포성의 경질 폴리우레탄 폼을 제조하였고, $270 \sim 320 kg/m^3$ 정도의 밀도를 나타내었다. 일반적인 반경질, 경질 폴리우레탄 폼의 밀도 $60 \sim 120 kg/m^3$ 보다는 다소 높은 특성을 보인다. 폼 유전율 계산 결과를 살펴보면, 마찬가지로 MWNT 를 첨가함에 따라 유전율의 실수부와 허수부가 증가하고 있다(Fig. 5). 그러나 허수항의 증가분은 거의 미세한 증가를 보였다.

획득한 유전율 데이터는 샌드위치 형태의 다층 구조의 반사손실을 모사하기 위해 사용되었다.

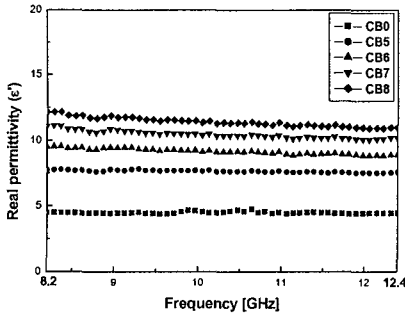


Fig. 3 Real part of permittivity vs. frequency for carbon black content.

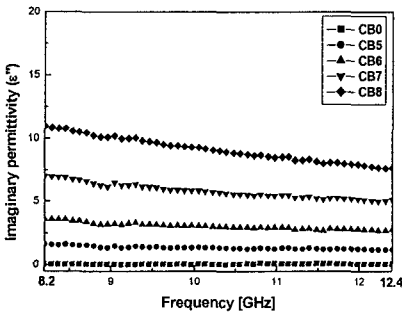


Fig. 4 Imaginary part of permittivity vs. frequency for carbon black content.

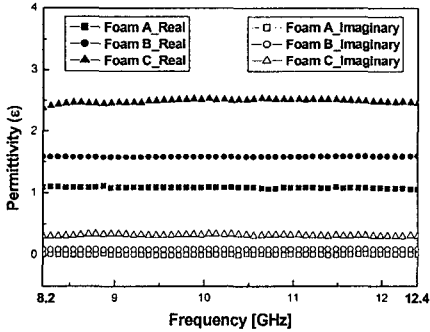


Fig. 5 Permittivity vs. frequency for PU foams.

3. 샌드위치 형태의 다층구조 시뮬레이션 및 반사손실 측정

3.1 샌드위치 구조 시뮬레이션

면재로는 CB5, CB6, CB7, CB8 을 사용하였고, 심재로는 Foam C 를 사용하였다. 마지막 층의 면재는 도체의 특성을 나타내는 CFRP 복합재료를 사용하였다. 면재의 두께는 0.5~2mm 범위에서 0.1mm 간격으로 반사손실 특성을 살펴보았으며, 심재의 두께는 면재 두께의 10~20 배 이상인 10mm 를 기준으로 두고 증감을 주었다. 시뮬레이션 결과로서, X-band 대역의 중심주파수

10~10.5GHz 에서 정합 특성이 우수하게 나타난 3 가지 종류의 샌드위치 구조 흡수체를 Fig. 6 에 나타내었다. Case 1 은 3 층형, Case 2 는 4 층형, Case 3 은 5 층형 샌드위치 구조에 대한 모델을 나타내고 있다. Table 1 는 각 Case 들에 대한 10dB 흡수 대역과 전체 두께를 나타내고 있다.

Table 1 Absorbing bandwidth and matching thickness of sandwich structures.

	10dB bandwidth [GHz]	Matching thickness[mm]
Case 1	1.4 (9.7~11.1)	12.9
Case 2	1.2 (9.6~10.8)	12.5
Case 3	3 (8.7~11.7)	9.9

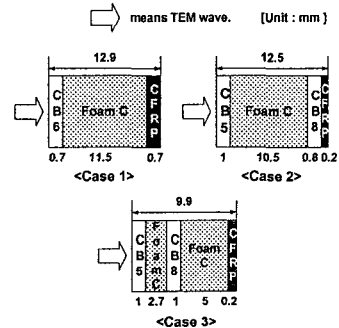


Fig. 6 Layer sequence and thickness of simulation models.

3.2 샌드위치 형태의 전파흡수체 제작

각각의 모델별로 해당하는 면재용 시편과 심재용품을 제작하였으며, 측정 시료의 가로, 세로 크기는 자유공간측정을 하기 위하여 150×150(mm)로 하였다. 이렇게 제작된 면재와 심재는 고온용 접착 필름(adhesive film)을 이용하여 이차 접합한 후, 압력 3 atm, 온도 120°C 조건에서 2 시간 동안 성형하였다.

3.3 반사손실 측정결과

TEM 모드에서의 반사손실을 측정하기 위한 자유공간측정 시스템의 구성도는 Fig. 7 과 같다[4].

세 가지 모델들에 대한 반사손실의 예측 결과들과 실험 결과들을 Fig. 8, Fig. 9 와 Fig. 10 에 나타내었다. Case 1 과 Case 2 의 경우에는 정합 특성을 보이는 중심주파수가 0.3GHz (10.3GHz → 10.0GHz)와 0.6GHz (10.1GHz → 9.5GHz) 가량 낮아지는 특성을 보이고 있으며, 전반적인 경향은 예측 결과보다 전체적으로 왼쪽으로 이동한 비슷한 분포를 보인다. Case 3 의 경우에는 중심주파수가 0.5GHz(10.3GHz → 9.8GHz) 정도 낮아지는 특성을 보였고, 흡수능력을 나타내는 반사손실 정도가 이

론결과에 비해서 많이 떨어지는 경향을 나타내었다. 중심주파수는 다소 낮아졌지만, 3 가지 경우 모두 10dB 흡수영역을 나타내는 주파수 폭은 거의 일치한다. 이와 같은 오차의 원인으로는 제작상의 오차, 각층의 유전율 데이터의 변화, 측정상의 오차 등으로 요약된다.

4. 결론

본 연구는 X-band 대역에서의 굽힘 강성이 우수한 샌드위치 구조의 전자파 흡수체에 대한 연구를 수행하였다. 복합재료의 면재와 폴리우레탄 심재를 제작하였다. 이들의 유전율 데이터를 확보하여 샌드위치 형태의 3 가지 모델을 제시하고 실제로 제작하여 자유공간 측정법으로 반사손실을 측정하였다. 실험 결과들의 전체적인 경향은 예측한 반사손실 그래프보다 0.3~0.6 GHz 가량 낮은 주파수에서 정합 특성을 보였고, 흡수대역의 주파수 폭은 거의 비슷한 경향을 보였다. 제작상의 오차, 각 층의 유전율 정보의 변화, 측정상의 오차 등으로 인해 예측 결과와 실험 결과가 달라진 것으로 판단된다. 향후 최적 설계 개념을 도입한다면 보다 체계적이고 우수한 흡수 성능을 가지는 샌드위치 구조의 전자파 흡수체를 제작할 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

이 연구는 과학기술부 지원으로 수행하는 21 세기 프론티어 연구사업(스마트 무인기 기술개발)의 일환으로 수행되었습니다

참고문헌

- (1) G. J. Nam, S. S. Lee, "Optimum design of broadband RAM's using multi-layer dielectrics," *Journal of the Korean Institute of Telematics and Electronics*, series A, Vol. 32, No. 1, 1995, pp. 70-78.
- (2) 오정훈, 복합재 적층판을 이용한 전자기파 흡수 구조체의 설계, 박사학위논문, 한국과학기술원, 2003.
- (3) 이호선, 두 개의 평판이 붙어있는 유전체 코팅 원통의 RCS 측정, 석사학위논문, 한국과학기술원, 2002.
- (4) Woo Seok Chin, Dai Gil Lee and Il Sung Seo, "Measurement of Complex Permittivity of Glass/Epox-y Composite by Free Space Method," *Proceedings of the 4th Korea-Japan joint Symposium on Composite Material*, Daejeon, Korea, 2003, pp. 69-70.

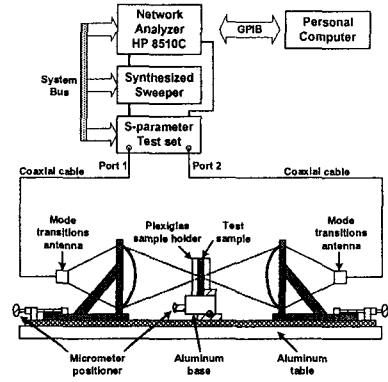


Fig. 7 Free space technique system.

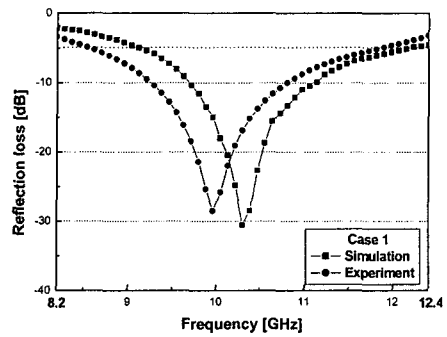


Fig. 8 Reflection loss of Case 1 vs. frequency for simulation and experiment.

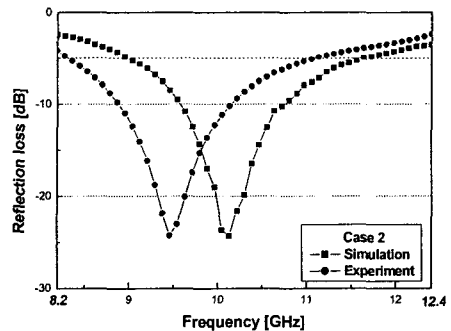


Fig. 9 Reflection loss of Case 2 vs. frequency for simulation and experiment.

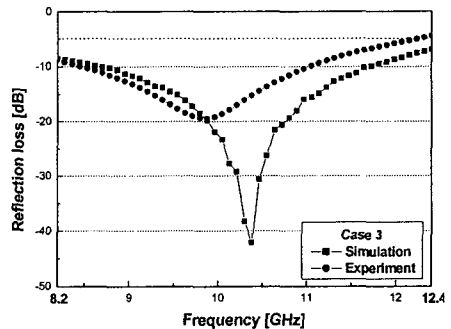


Fig. 10 Reflection loss of Case 3 vs. frequency for simulation and experiment.