

論文

섬유강화 복합재료의 전자파 차폐 기구물에 대한 적용에 관한 연구

박기연*, 이상의*, 이원준*, 김천곤**, 한재흥***

The Application of Fiber-Reinforced Composites to
Electromagnetic Wave Shielding Enclosures

Ki-Yeon Park*, Sang-Eui Lee*, Won-Jun Lee*, Chun-Gon Kim**, Jae-Hung Han***

ABSTRACT

As the structures of the high performance electronic equipments and devices recently become more complex, the electromagnetic interference (EMI) and compatibility (EMC) have been very essential for commercial and military purposes. Thus, sensitive electrical devices and densely packed systems need to be protected from electromagnetic wave. In this research, glass fabric/epoxy composites containing conductive multi-walled carbon nanotube (MWNT) and carbon fiber/epoxy composites as electrical shielding materials were fabricated and electrical properties of the composites were measured. The concerning frequency band is from 300 MHz to 1 GHz. The performances of composite shielding enclosures were predicted using electromagnetic wave 3-D simulation tool, CST Microwave Studio. The shielding enclosure made of carbon fiber/epoxy composites were fabricated and the shielding effectiveness (SE) was measured in the anechoic chamber.

초 록

최근들어 고성능의 전자 장비들의 구조는 점점 복잡해지고, 이로 인해 발생하는 전자파 간섭(EMI) 및 적합성(EMC) 문제는 상업적으로나 군사적으로 매우 중요한 문제이다. 자동차, 비행기, 디스플레이 산업 등에서 민감한 전자 장비들과 밀집된 시스템들은 전자기파로부터 보호될 필요성이 있다. 다중벽 탄소나노튜브(MWNT)가 첨가된 유리직물 복합재료와 전도성이 우수한 탄소복합재료를 차폐 물질로 제작하고 전기적 특성을 측정하였다. 관심 주파수 영역은 300 MHz ~ 1 GHz의 영역이다. 전도성 필러가 첨가된 유리직물 복합재료와 이것으로 이루어진 차폐 기구물의 차폐 특성은 3-D 전자기장 해석 툴을 사용하여 예측해 보았다. 탄소복합재료 기구물의 차폐 특성은 전자파 무반향실에서 측정되었다. 설계에 따라 -20 dB 이상의 전자파 차폐 효율을 보이는 기구물을 제작할 수 있음을 확인하였다.

Key Words : 전자파 간섭(Electromagnetic Interference, EMI), 차폐 기구물(Shielding Enclosure), 차폐 성능(Shielding Effectiveness), 섬유강화 복합재료(Fiber-Reinforced Composites), 다중벽 탄소나노튜브(MWNT)

1. 서 론

최근 들어 전자장비의 사용이 급증하면서 전자파 상호 간섭에 의한 여러 가지 문제들이 발생하였고, 전자파 차폐 및

EMI, EMC 등의 대책에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. EMI란 외부기기에 교란을 주는 전자파 간섭 혹은 방해를 의미하며 철저히 억제해야 할 대상이다. EMC란 전자기 양립성 또는 전자기 적합성을 의미한다. 주어진 장비가 외부로부터의 방해 전자

* 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공 대학원

** 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공

*** 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공, 교신저자 (E-mail: jaehunghan@kaist.ac.kr)

파에 의해 영향을 받지 않고 정상적인 동작을 하는 상태를 의미한다. EMC는 넓은 의미에서 전자파 간섭 (EMI)의 개념과 전자파에 대한 내성 (electromagnetic susceptibility, EMS)의 개념을 모두 포함하는 용어라 할 수 있다[1, 2].

비행체에 사용되는 전자장비들은 금속 전자파 차폐 기구물 (shielding enclosure) 내부에 탑재될 수 있다. 비행체에 사용되는 재료는 가벼워야 하므로, 금속 코팅이 입혀진 기구물의 형태를 취해야 한다. 그러나 이런 형태는 하중을 지지하는 역할을 충분히 수행할 수가 없다. 최근 비강성 및 비강도 뿐만 아니라, $10^4 \sim 10^5$ S/m의 우수한 전기 전도도를 가지는 탄소섬유 강화복합재료로 비행체가 제작되어지면서, 내부의 격벽이나 구조물 자체가 전자파 차폐 기구물의 특성을 가지게 되었다. 그러나 이러한 금속성의 특징은 내부로 투과된 전자파가 내부 장비들에 전자파 방해를 야기할 수 있는 단점이 있다.

본 연구에서는 두 종류의 복합재료를 이용하여 차폐 기구물의 적용성에 관한 해석 및 실험적 연구를 수행하였다. 전자파 간섭 및 방사 현상이 빈번하게 발생하는 초고주파 대역에서 저주파 영역인 300 MHz ~ 1 GHz 대역을 관심 주파수로 설정했다. 먼저, 구조적 하중지지와 전자파 흡수성을 가지도록 MWNT를 분산시킨 유리섬유 강화복합재료를 제작하였다. 이들의 유전율을 실험적으로 측정하여 손실 재료로서의 적용성을 고찰하였으며, 측정된 유전율 데이터를 이용하여 단층형 복합재료와 직육면체 구조의 복합재료 기구물의 차폐 성능 (Shielding Effectiveness, SE)을 시뮬레이션 툴을 사용하여 예측해보았다. 다음으로는, 전기 전도도가 우수한 탄소섬유 강화복합재료를 제작하여 전기 전도도를 측정하였고, 탄소섬유 복합재료 차폐 기구물을 제작하여 금속 기구물과 함께 차폐 성능을 무반향실 (anechoic chamber)에서 측정하였다.

2. 차폐 기구물 및 차폐 성능

2.1 차폐 기구물 (Shielding Enclosure)

전자파 차폐 기구물은 기계적 · 전자기적으로 내부의 전자장비 및 시스템을 보호하고 차폐하는 구조물을 일컫는다. 재료는 주로 금속들로 사용되며, 많은 개구면을 갖는 직육면체 구조를 갖는다 (Fig. 1). 이러한 개구면은 열전도와 입출력 배선 등을 위해서 필요하고, 외부에서 입사되는 전기장 특성에 큰 영향을 미치기 때문에 기구물 설계 시 중요한 요소로 작용한다[3].

2.2 차폐 성능 (Shielding Effectiveness, SE)

손실이 있는 재료의 경우에는 인가된 전력은 물질을 통해 반사, 흡수 및 투과가 이루어지고, 이들에 대한 관계를 나타내

면 식 (1)과 같다. 여기서, P_{inc} 는 입사된 전력량, P_{ref} 는 반사된 전력량, P_{trans} 는 투과된 전력량, P_{abs} 는 흡수된 전력량을 나타낸다[3].

전자파 차폐의 정량적인 분석은 차폐 성능을 통해서 분석한다. SE의 정의는 식 (2)와 같이 외부에서 차폐 벽으로 입사된 전자파 전력 크기와 차폐 벽을 통과해 내부로 들어오는 전자파 전력 크기의 비로서 정의된다. 차폐 기구물이 없을 경우와 있을 경우의 차이에 따른 전자파 전기장 크기의 제곱의 비로 정의되기도 한다. 여기서, E_{inc} 와 E_{trans} 는 각각 입사 및 투과된 전기장의 크기를 나타낸다 [4, 5].

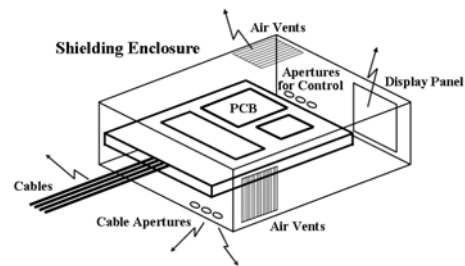


Fig. 1 Shielding enclosure.

$$P_{inc} = P_{ref} + P_{trans} + P_{abs} \quad (1)$$

$$SE(dB) = 10 \log \frac{P_{trans}}{P_{inc}} = 10 \log \frac{E_{trans}^2}{E_{inc}^2} \quad (2)$$

3. 유리직물 복합재료 기구물

3.1 전도성 필러를 첨가한 유리직물 복합재료

유리직물 복합재료에 전도적 특성이 우수한 MWNT [6]를 무게비로 0.0 ~ 5.0 wt% (weight percent)까지 변화시키면서, 총 8 종류의 프리프레그를 제작하였다. 제작 시 균일하게 MWNT 분체가 분포하는 것이 중요하기 때문에 (주)한국화이바에서 프리프레그 제작 시 에폭시 수지(resin)에 잘 분산시켜서 직물에 도포하였다. 첨가량이 5.0 wt% 이상의 경우에는 MWNT 분체의 농도 증가로 제작이 어려워 제외하였다. 참고로 MWNT 1.0은 MWNT를 복합재 전체 무게에 대한 1.0 wt% 첨가한 시편을 의미한다. 프리프레그는 (주)한국화이바의 Glass fabric/epoxy K618 제품이며, MWNT는 (주)일진나노텍의 CVD MWNT95 제품을 사용하였다. 오토클레이브를 사용하여 압력 3 atm, 온도 80 °C 에서 30분, 130 °C 에서 90분 동안 경화시켜 제작하였다. 시편의 크기는 25×25 mm, 두께는 0.85 ~ 0.90 mm의 범위를 가졌다.

제작된 복합재료를 임피던스 분석기 (Agilent E4991A)를 이용하여 저주파 대역인 0.3 ~ 1.0 GHz까지의 유전율을 측정

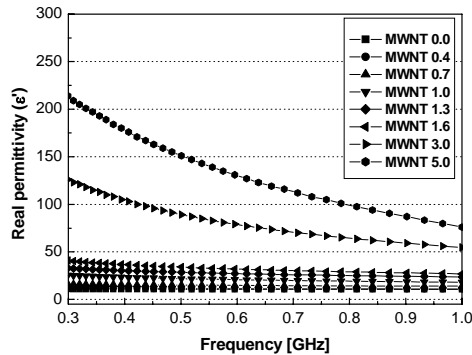


Fig. 2 Real permittivity.

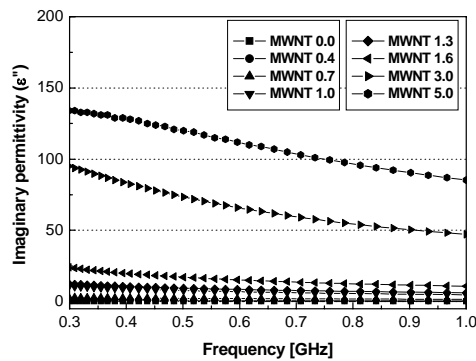


Fig. 3 Imaginary permittivity.

하여, Fig. 2와 3에 나타냈다. MWNT의 함량이 증가할수록 유전율의 실수부와 허수부 모두 증가하였으며, 주파수가 증가함에 따라 유전율의 실수부와 허수부가 단조 감소하였다. MWNT 3.0과 MWNT 5.0의 경우에는 유전율의 실수부와 허수부가 현저하게 증가하고 있는데 도전성 조직의 형성이 급격하게 이루어졌기 때문이다[7].

3.2 단층형 유리직물 복합재료의 차폐 성능 예측

3차원 전자기장 해석 프로그램인 CST MicroWave Studio를 사용하여 단층형 구조의 차폐 특성을 살펴보았다. 해석 및 경계 조건은 수직 입사하는 전자기파에 대한 전송선로(waveguide) 중간에 시편을 두고 입력단과 출력단을 구분하여 입사된 전력량과 이에 대한 투과한 전력량을 계산하여 식 (2)에 나타난 차폐 성능을 결과로 도출하였다. 해석 주파수 대역은 0.3~1.0 GHz 이다. MWNT 복합재료는 유전적 특성이 우수한 MWNT 3.0과 5.0을 사용하였으며, 앞서 측정된 유전율 데이터를 이용하여, 평판 두께 2.0, 4.0, 6.0 mm 대해서 해석을 수행하였다.

Fig. 4는 해석 결과를 나타내고 있다. MWNT 3.0과 5.0

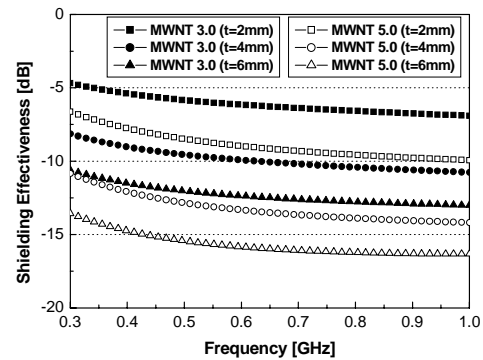


Fig. 4 SE results of single layered MWNT composites.

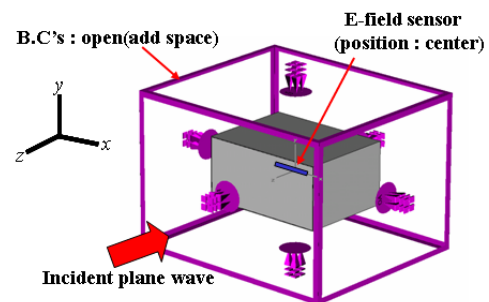


Fig. 5 Simulation model of a shielding enclosure.

모두 주파수 전 대역에서 약 70% (-5 dB) 이상의 전력을 차폐하고 있음을 나타내고 있으며, MWNT 3.0 ($t=6\text{mm}$)과 MWNT 5.0 ($t=4\text{mm}$, 6mm)의 경우에는 전 대역에서 약 90% (-10 dB) 이상의 전력을 차폐하고 있음을 보여준다.

3.3 유리직물 복합재료 기구물의 차폐 성능 예측

마찬가지로 사용된 해석 툴은 3차원 전자기장 해석 프로그램인 CST MicroWave Studio를 사용하여 기구물의 전기적 차폐 특성을 살펴보았다. 실제로 기구물의 형태는 직육면체 구조에 여러 개구부를 가지나, 본 연구에서는 그러한 세부적인 설계 관점을 맞추기 보다는 복합재료의 적용성을 고찰하는 것이 목적이다. 따라서 개구부가 없는 $400 \times 300 \times 200$ mm 크기의 MWNT 3.0 과 MWNT 5.0 복합재료로 이루어진 기구물에 대해 벽의 두께가 2.0, 4.0, 6.0 mm 의 조건을 주고 해석을 수행하였다. 경계조건은 무한 자유공간 모사를 위해 open(add space)를 주었으며, 해석 주파수 대역은 0.3~1.0 GHz 로 하였다 (Fig. 5). 입사파는 경계조건으로부터 z 축 방향으로 진행하는 평면파(plane wave)를 가정하였고, 평면파가 xy 평면에 입사될 때의 SE를 구하였다. 기구물 정중앙에 전계 측정 탐촉자(probe)를 두었다.

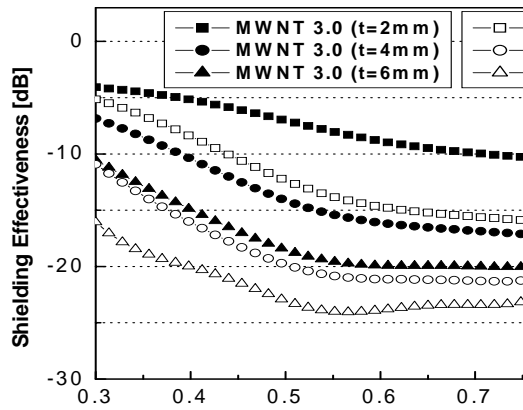


Fig. 6 SE results of MWNT composite enclosures.

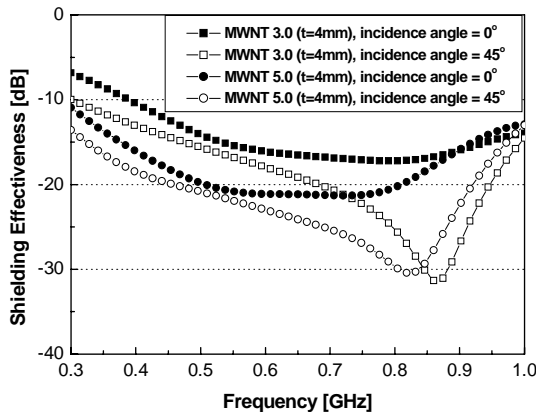


Fig. 7 SE results of MWNT composite enclosures with incidence angle.

여기서, 인가된 평면파는 입사된 전력을 의미하고, 전계 측정 탐촉자는 투과된 전력을 측정하는 소자이다.

Fig. 6은 복합재 기구물의 차폐 특성 해석 결과를 나타내고 있다. 앞선 평판 복합재료의 차폐 특성 결과와 마찬가지로, 복합재료 기구물의 경우에도 MWNT 함량이 증가할수록, 시편이 두꺼울수록 그 차폐 성능이 증가함을 알 수 있었다. 평균적으로 평판 구조물에 비해서 차폐 성능이 증가하였음을 알 수 있다. 이는 입사된 전자파가 기구물 내부의 전계 측정 탐촉자로 투과된 전력량이 줄어들었음을 의미한다. MWNT 5.0의 경우, 전 대역에서 약 70% (-5 dB) 이상의 전력을 차폐할 수 있으며, 두께가 4 mm 이상에서는 약 90% (-10 dB) 이상의 전력을 차폐할 수 있음을 알 수 있었다. 이를 통해 MWNT 복합재료가 차폐 기구물로서 충분히 적용될 수 있음을 보여주는 결과이다. 차폐 기구물의 차폐 특성은 이를 구성하는 재료의 물성과 두께, 그리고 기구물의 크기에 따라 달라질 수 있다. 본 연구를 통해 이런 설계 변수들을 잘 조절함으로써 흡수 성능이 우수한 복합재료 차폐 기구물의 제작 가능성을 확인하였다.

Fig. 7은 경사 입사파에 대한 복합재 기구물의 차폐 특성 해석 결과를 나타내고 있다. 참고로 입사각은 입사파의 진행 방향과 투과되는 평면의 수직 방향과 이루는 각을 의미한다. 따라서 평면에 수직 입사하는 전자기파의 입사각은 0°이다. 해석 및 경계 조건 등은 앞선 해석과 동일하며 평면파의 입사각을 45°로 준 경우, MWNT 3.0과 MWNT 5.0의 두께 4.0 mm의 경우, 입사각 45°의 해석을 수행하였다. 차폐 성능을 살펴보면, 경사 입사의 경우에는 수직 입사의 경우보다 차폐 성능이 약 5~10 dB가 낮아지는데, 이는 투과된 전력량이 줄어들었음을 의미한다. 0.7~0.9 GHz의 특정 주파수 영역에서는 투과된 전력이 현저하게 줄어드는 경향을 보이고 있다.

4. 탄소 복합재료 기구물

4.1 탄소 복합재료

본 연구에서는 전도적 특성이 우수한 탄소/에폭시 복합재료를 제작하여 기구물에 적용해보았다. (주)한국화이바의 탄소/에폭시 CU-125 프리프레그를 사용하였다. 성형 사이클은 압력 1.2 atm, 온도 80 °C에서 30분, 압력 7 atm, 온도 130 °C에서 120분 동안 경화시켜 제작하였다. 표면저항측정기(Four-point probe)를 사용하여 표면저항을 측정하여, 전기 전도도가 약 10^4 S/m임을 확인하였다.

4.2 금속 기구물의 차폐 성능 예측

앞선 2.2절에서 다루었던 해석 및 경계 조건은 동일하며, 재질을 완전도체 (PEC, perfect electric conductor)로 선택하여 해석을 수행하였다. 전 영역에 대해서 약 -100 dB 정도의 완전 차폐특성을 나타내었다. 완전도체의 경우 2mm 이상의 두께에 대해 변화시켜보았으나, 전혀 영향을 받지 않고 같은 특성을 보였다. 이는 전자계 내에 있는 도체의 특성을 나타내는 변수로 표피두께 (skin depth)라는 특정 이상의 두께에 대해서는 동일한 특성을 나타낸다[8].

4.3 탄소 복합재료 기구물의 제작

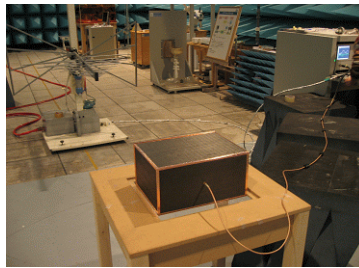
탄소/에폭시 프리프레그는 (주)한국 화이바의 CU-125를 사용하였다. 각 면은 [(0/90)₃]_s로 12장씩 적층하여 제작하였으며, 성형 후 평판의 평균 두께는 1.32mm였다. 각각의 면을 아교(glue)를 사용하여 접합하였으며, 전자기파가 접합면의 아주 미세한 틈에서의 산란·회절하는 특성을 막기 위해, 구리 필름(copper film)을 이용하여 접합 부분을 봉하였다. 제작된 직육면체 기구물의 크기는 400×300×200 mm이다. 금속 기구물은 알루미늄으로 제작되었고, 동일한 크기를 갖으며, 제작의 편의상 각 면의 접합은 볼트 체결로 연결되는 관계로 두께는 10mm로 제작하였다.

4.4 탄소 복합재료 기구물의 차폐 성능 측정

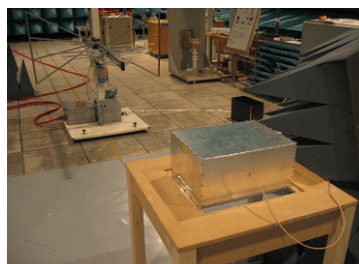
본 연구의 차폐 특성 실험은 한국전자통신연구원 (ETRI, 대전)의 전자파 무반향실 (anechoic chamber)에서 수행하였고, 이러한 측정 공간은 EMI 실험에 적합하다. 송신용 안테나는 ETS사의 3142B 모델을 사용하였으며, 수신용 다이폴 안테나는 기구물의 정 가운데에 두었다. 이를 위해 안테나는 공기의 유전율을 가지는 스티로폼 위에 위치시켰다. 전력 측정을 위한 회로 분석기(network analyzer)는 Agilent E8362B 모델을 사용하였다.



(a) Initial state w/o enclosure



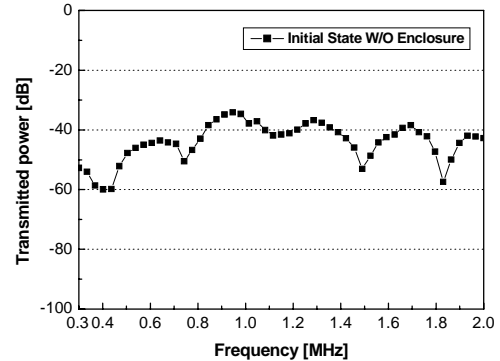
(b) Shielding state w/ carbon composite enclosure



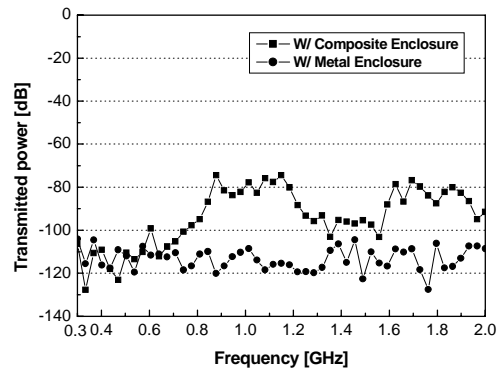
(c) Shielding state w/ metal enclosure

Fig. 8 Experimental setup for measuring transmitted power.

Fig. 8은 투과된 전력 측정을 위한 실험을 나타내고 있다. (a)는 기구물이 없는 초기 상태를 나타내고, (b)와 (c)는 복합재 기구물과 금속 기구물이 있는 차폐 상태를 나타내고 있다.



(a) Initial state w/o enclosure



(b) Shielding state w/ enclosure

Fig. 9 Measured transmitted power.

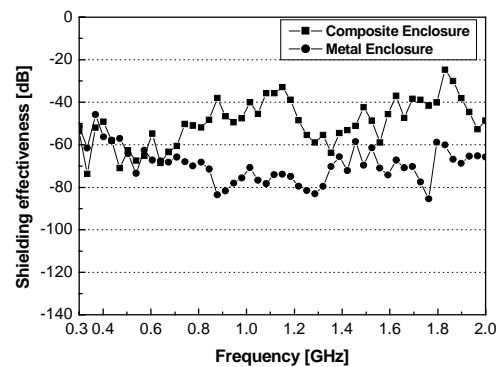


Fig. 10 SE results of shielding enclosures.

차폐 측정 주파수범위는 0.3~2.0 GHz 대역에서 수행하였는데, 송신용 안테나의 작동 범위는 2 GHz 이내의 영역에서 가능했기 때문이다. 앞선 차폐 성능의 정의에 따라서 기구물의 유무에 따른 전자기파의 전력을 측정하였고, 식 (2)에 따라 차폐 성능 결과를 계산하였다.

Fig. 9는 투과된 전력의 측정 결과를 나타내고 있으며, Fig. 10은 기구물의 차폐 특성 측정 결과를 나타낸다. 복합재료 기구물의 측정 주파수 전체에 대한 SE의 평균값은 약 -50 dB를 나타내었고, 금속 기구물의 경우에는 약 -70 dB를 나타내었다. 성능은 금속 기구물이 우수하나, 무게가 가볍고 두께가 얇은 복합재료의 경우에도 거의 대등한 차폐 특성을 얻을 수 있음을 확인하였다.

5. 결 론

본 연구는 복합재료를 사용하여 전자파 차폐 기구물에 적용하고자 기본적인 연구를 수행하였다. 유리직물 복합재료를 사용한 해석적 연구와 탄소 복합재료를 사용한 실험적 연구를 수행하였다.

먼저 유리섬유 복합재료에 구조적 하중지지 외에 전자파 차폐 성능을 가지도록 MWNT를 혼합하여 제작하고, 임피던스 분석기를 사용하여 저주파 대역 (0.3~1 GHz) 에서 이들의 유전율을 측정해 보았다. 측정된 유전율 정보를 사용하여 단층형 평판 구조와 직육면체 복합재 기구물의 차폐 성능을 3-D 전자기장 해석 툴을 사용하여 전자기장 해석을 수행하였다. MWNT 5.0 복합재 기구물의 경우, 전 대역에서 약 70% (-5 dB) 이상의 전력을 차폐할 수 있으며, 두께가 4mm 이상에서는 약 90% (-10 dB) 이상의 전력을 차폐할 수 있음을 알 수 있었다. 이를 통해 MWNT 복합재료가 차폐 기구물로서 충분히 적용될 수 있음을 살펴보았다.

전도성이 우수한 탄소섬유 복합재료를 제작하여 전기 전도도를 측정하였고, 직육면체의 기구물을 제작하여, 금속 기구물과 함께 무반향실에서 차폐 특성 실험을 수행하였다. 제작된 기구물의 차폐 성능 측정을 통해, 금속 기구물이 차폐 특성이 더 우수하나, 탄소/에폭시 복합재료의 경우 전 대역에서 거의 99% (-20 dB) 이상의 전계를 차폐할 수 있음을 확인하였다.

후 기

이 연구는 과학기술부 지원으로 수행되는 21세기 프론티어 연구사업 (스마트무인기기술개발)의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 1) 강태원, 정연춘, "EMI/EMC 개론 및 측정기술," *Electronic Systems*, 2000. 6, pp. 49~59.
- 2) K.-Y. Park, S.-E. Lee, C.-G. Kim, J.-H. Han, "Fabrication and Electromagnetic Characteristics of Electromagnetic

Wave Absorbing Sandwich Structures," *Composites Science and Technology*, Vol. 66, pp. 576-584, 2006.

- 3) 정기범, 정연춘, "EMC를 고려한 전자파 기구물의 설계기술," 한국전자과학회지, 산업체 기고문, 2004, 제15권, 제2호, pp. 124-131.
- 4) F. Ustuner, A. Akses, I. Araz, B. Colak, "A method for evaluating the shielding effectiveness of small enclosures," *EMC International Symposium*, Vol. 2, 2001, pp.708-712.
- 5) N.C. Das, D. Khastgir, T.K. Chaki and A. Chakraborty, "Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon black and carbon fibre filled EVA and NR based composites," *Composites: Part A*, Vol.31, 2000, pp. 1069-1081.
- 6) 이상의, 박기연, 김천곤, 한재홍, "다중벽 탄소나노튜브/에폭시 복합재료의 유전율에 관한 연구," 한국복합재료학회지, 제17권, 제3호, 2004, pp. 38-44.
- 7) 이상의, 박기연, 이원준, 김천곤, 한재홍, "다중벽 탄소나노튜브가 첨가된 평직 유리섬유/에폭시 복합재료의 미세구조 및 전자기적 특성," 한국복합재료학회지, 제19권, 제1호, 2006, pp. 36-42.
- 8) William H. Hayt, Jr. and John A. Buck, *Engineering Electromagnetics*, 6th edition, McGraw-Hill, 2001.