THE JOURNAL OF KOREAN INSTITUTE OF ELECTROMAGNETIC ENGINEERING AND SCIENCE. 2020 November.; 31(11), 947～955.

http://dx.doi.org/10.5515/KJKIEES.2020.31.11.947
ISSN 1226-3133 (Print) · ISSN 2288-226X (Online)

위성체의 CFRP 패널, MLI, RF 스크린 전자파 차폐 효과

Electromagnetic Shielding Effectiveness of CFRP Panels, MLI, and RF Screens for Spacecraft Applications

김 태 윤*,** · 이 재 현*

Tae-Youn Kim*,** · Jae-Hyun Lee*

요 약

본 논문에서는 위성에서 사용하는 복합재(CFRP) 패널, MLI 및 RF 스크린의 전자파 차폐 효과에 대한 연구 결과를 제시하고자 한다. CFRP 패널 및 MLI 등은 전자파 차폐를 목적으로 사용하는 것은 아니지만 구성 재질이나 적용 형상에 따라 부가적으로 차폐효과를 가질 수 있다. 위성체 레벨에서 전자파적합성을 분석하기 위한 목적으로 패널이나 위성 외장재가 어느 정도의 차폐특성을 갖는지 평가될 필요가 있으며, 이 경우 실제 위성의 형상에 대한 차폐 특성이 고려되어야 한다. 따라서 위성체 레벨에서 차폐특성을 확인할 수 있는 방법의 일환으로 전자파 챔버에서 자유공간방법을 이용하여 구조체 패널과 적용재료에 대한 차폐특성을 측정하였다. 측정 대상의 주변을 금속 벽으로 마감하지 않은 채 차폐효과를 측정하였으며, 측정 결과 MLI를 포함한 복합재 패널이 2 GHz부터 8 GHz 주파수 대역에서 10～30 dB의 차폐특성을 갖고 있으며 저주파 대역에서도 20 dB 정도의 차폐효과가 있음을 확인할 수 있었다.

Abstract

In this study, the electromagnetic shielding effectiveness of the composite panels, MLI, and RF screens used in spacecraft has been examined. CFRP panels and MLI are not used for electromagnetic shielding; however, they can have an additional shielding performance depending on the constituent material and applicable shape. To analyze the electromagnetic compatibility at the satellite level, it is necessary to evaluate the degree of shielding characteristics of the spacecraft panel and exterior material. In this context, the shielding characteristics of the actual satellite configuration must be taken into consideration. Therefore, to check the shielding characteristics at the satellite level, the shielding effectiveness of the structural panel and applied materials was measured using the free space method in the EMC chamber. It was measured under the condition that the periphery of the measurement object was not covered with a metal wall. The results of the experiment confirmed that the CFRP panel that included MLI could provide a shielding effectiveness of 10 to 30 dB in the frequency band of 2 GHz to 8 GHz and approximately 20 dB in even the low frequency band.

Key words: Shielding Effectiveness, CFRP Panel, MLI, Electromagnetic Compatibility, Spacecraft

---

「본 연구는 2018년도 충남대학교 학술연구비 지원을 받아 수행된 연구임.」

*충남대학교 전파정보통신공학과(Department of Radio and Information Communications Engineering, Chungnam National University)
**한국항공우주연구원(Korea Aerospace Research Institute)

· Manuscript received 2020 September 9, 2020 ; September 30, 2020 ; Accepted November 2, 2020. (ID No. 20200909-076)
· Corresponding Author: Jae-Hyun Lee (e-mail: jaehyun@cnu.ac.kr)

ⓒ Copyright The Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science. All Rights Reserved.

Ⅰ. 서 론

우주환경에서 동작하는 인공위성은 임무기간 동안 위성의 RF 송수신에 의해 발생되는 고출력 전자파나 전자장비의 동작에 의해 발생될 수 있는 의도하지 않은 전자파 환경과 전자장비의 오동작을 유발할 수 있는 우주방사선에 노출될 수 있으며[1], 위성 구조물이나 위성 탑재장비의 하우징은 구조적 기능 이외에 이러한 우주방사선이나 전자파환경에 대한 차폐효과(shielding effectiveness: SE)를 가져다 줄 수 있다. 전통적으로 위성의 구조체는 알루미늄 재질로 구성되어 왔지만, 위성의 경량화를 목적으로 복합재료(composite materials)의 사용이 점점 더 늘어나고 있다. 복합재는 2가지 이상의 구성 소재를 조합하여 기계적인 특성을 강화시킨 소재로, 위성에 적용되는 대부분의 소재는 탄소섬유 복합재(carbon fiber reinforced polymer/plastic: CFRP)이다. 이러한 복합재는 전기전도도가 낮아 기존 알루미늄 소재 대비 전자파에 대한 차폐효과는 크지 않지만 복합재료에 카본블랙이나 탄소나노튜브 등의 다양한 충전재를 첨가하여 전기적 특성이 강화된 복합재도 많이 개발되었고[2], 복합재에 대한 전기적 차폐효과에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. 위성 구조체 외곽에는 위성의 열적 특성을 보장하기 위해 다층박막절연재(multi-layer insulator: MLI)를 적용하고 있는데, 절연재 내부에 알루미늄 층이 여러 겹으로 구성되어 있어 전자파에 대한 일부 차폐효과가 있는 것으로 알려져 있다. 또한 통신위성이나 RF 탑재체를 운용하는 위성의 경우, 위성체 외곽을 완전한 케이지로 구성하기 위해서 위성 구조체 패널간 연결 부위나 위성 하니스 인입을 위한 오프닝 부분에 메쉬 타입의 RF 스크린이나 Al. 테이프 등을 적용하여 차폐의 완결성을 보장하기도 한다.

이렇듯 다양한 외장재와 복잡한 형상으로 이루어진 위성의 구조체의 차폐효과를 분석하는 것은 간단한 일은 아니다. 차폐는 구조물 내부에 입사되는 또는 내부에서 방출되는 전자파를 차단하거나 감쇄시키는 것으로 구조물의 형상과 물성에 따라 특성은 크게 달라질 수 있으므로, 구성품 하나의 차폐특성을 안다고 해서 실제 위성 구조체에 동일한 차폐특성을 적용하기는 어려움이 있다. 또한 위성 비행모델(flight model: FM)의 경우, 가까이 접근하여 측정하는 것조차 제한적이며 측정 목적에 맞게 위성의 형상을 변형하는 것은 불가능한 일이므로 가능한 있는 그대로의 조건에서 차폐효과를 검증할 수 있어야 한다. 본 논문에서는 위성에서 사용하는 복합재 패널과 위성 구조체 외곽에 적용하는 구성재에 대해 먼저 살펴본 후 위성시스템의 전자파적합성 분석에 적용할 수 있는 위성 구조체 패널 및 MLI 등의 물질에 대한 차폐효과를 제시하고자 한다. 본 논문에서 살펴보고자 하는 CFRP 패널 및 MLI 등은 본래의 사용 목적이 전자파 차단을 위한 것이 아니며, 위성에 적용됨으로써 부가적으로 갖는 차폐효과를 위성체 레벨에서 평가하고자 하는 것이므로 실제 위성 형상에 의한 차폐 영향을 고려할 수밖에 없다. 따라서 실제 위성체 레벨에서도 차폐특성을 확인할 수 있도록 전자파 챔버에서 자유공간방법을 이용하여 구조체 패널과 적용재료에 대한 차폐특성을 측정하였고, 측정결과에 대한 분석결과를 제시하였다.

Ⅱ. 전자파 차폐 특성 이론 및 측정 방법

자유공간에서 전자파는 특정 매질을 만나게 되면 매질의 특성에 따라 반사와 흡수가 일어나면서 매질을 통과하는 에너지의 크기가 감쇠되는데, 이 감쇠되는 정도를 차폐효과라고 한다. 차폐효과는 입사된 전자파와 투과된 전자파의 크기 비율로 식 (1)과 같이 정의하며, P_1, E_1, H_1 은 각각 입사파 전력, 전계, 자계를 나타내고, P_2, E_2, H_2 는 매질을 통과하여 전달된 전력, 전계, 자계를 나타낸다[3].

$$SE(dB) = 10\log\frac{P_1}{P_2} = 20\log\frac{E_1}{E_2} = 20\log\frac{H_1}{H_2} \quad (1)$$

차폐효과를 측정하는 방법은 원거리장에서의 측정방법과 근거리장에서의 측정방법으로 나눠진다. 원거리장 조건에서 차폐특성을 측정하는 방법은 Coaxial TEM cell 방법, 자유공간방법, Nested reverberation chamber 방법 등이 있다. Coaxial TEM cell 방법은 동축선로의 구조와 측정시편을 장착하는 방법에 따라 ASTM ES7-83 방법과 ASTM D4935 방법이 있는데, 국제적으로 가장 많이 사용

되는 차폐소재에 대한 표준 측정방법이 ASTM D4935 방법이다. 자유공간방법은 자유공간에서 두 안테나를 이용하여 차폐특성을 측정하는 방법으로, 보통 전자파 챔버에서 측정하게 된다. Nested reverberation chamber 방법은 잔향실(reverberation chamber)을 이용하는 방법으로, 큰 잔향실 내에 작은 잔향실이 들어 있는 중첩된(nested) 잔향실이 사용된다. 근거리장에서의 측정방법으로는 이중 TEM 셀 방법, 루프 안테나 방법 등이 있다. 이중 TEM 셀은 단면이 직사각형인 두 개의 TEM 셀이 연결된 구조이며, 연결된 부분에 개구부가 있어 측정하고자 하는 소재의 시편을 부착할 수 있다. 루프 안테나 방법은 두 개의 작은 루프 안테나를 이용하여 측정하는 방법으로, 두 루프의 축이 동일한 동축 루프 배치 구조로 측정하는 방법과 두 루프 안테나가 소재 평면에 수직인 한 평면에 같이 놓여 있는 동일평면 루프 배치 구조로 측정하는 방법이 있다[4].

측정 대상 소재의 종류, 물리적 형상, 물성 특성, 사용목적, 관심주파수 등에 따라 차폐효과를 측정하는 방법은 달라질 수 있다. 측정 방법에 따라 측정 소재가 제한되기도 하며, 특정 치구를 이용해서 시험을 해야 하거나, 정확한 결과를 얻기 위해 많은 측정 횟수 또는 상당한 시간을 소요하기도 한다. 정확한 결과를 도출하기 위해서는 측정환경을 표준 규격(MIL-STD-285)에서 요구하는 조건으로 구성하여 측정값과 이론값의 차이를 보정할 수 있어야 한다. 하지만 앞에서 언급한 바와 같이 본 논문에서는 완전한 위성체 형상에 대해 차폐특성을 측정할 수 있는 교두보를 마련하고자 전자파 반무반향실에서 자유공간 조건 하에서 측정샘플에 대해 금속 벽으로 주변을 마감하지 않은 조건에서 차폐효과 특성을 측정하였다.

Ⅲ. 차폐효과 측정대상 및 실험구성

3-1 측정샘플

본 논문에서는 특성이 다른 두 개의 CFRP 패널과 다층박막절연재(MLI)를 대상으로 차폐효과 측정을 수행하였다. CFRP는 탄소 강화 섬유에 에폭시를 첨가하여 만든 플라스틱으로, 위성 구조물로 사용하는 CFRP 패널은 일본 Toray사의 M55J급 및 T700G급 CFRP facesheet에 알루미늄 honeycomb을 결합한 샌드위치 형태이며, 가로 0.7 m, 세로 0.8 m, 두께는 0.03 m로 구성되어 있다. 각 패널은 CFRP 탄소섬유 8개 층이 UD(uni directional)하게 제작되었다. 위성 구조체는 고탄성률을 갖는 M55J 탄소섬유를 주로 사용하고 있다. M55J 탄소섬유는 에폭시 레진 비율과 facesheet 두께가 T700G보다 작고 전도성 특성이 T700G보다 더 우수하다. T700G의 경우, 인장강도가 M55J보다 높아 무거운 유닛을 배치하기 위한 부분에 적용하고 있다.

그림 1은 CFRP 샌드위치 패널의 형상을 보여준다. 측정에 이용된 탄소섬유는 0°, 90°, 45°, −45°, −45°, 45°, 90°, 0° 방향으로 적층되었다. 탄소섬유의 경우, 적층각도에 따라 전기적 특성이 다르게 나타나며, 탄소섬유가 전계방향에 평행하게 구성되었을 경우에 전기전도도가 높게 나타난다[5]. 또한 탄소섬유를 결합하는 에폭시 레진(resin)층의 존재로 인하여 금속에 비하여 전기전도도가 상대적으로 낮지만, 개구부가 없는 CFRP 패널 자체적인 차폐특성은 높게 나타나고 있다.

MLI는 복사 및 전도 열 전달을 차단하여 위성의 열제어를 목적으로 사용되며, 여러 층의 마일라(Mylar)나 캡톤 필름으로 이루어져 있는데, 필름의 단면 또는 양면에 알루미늄 처리를 하고, 그 사이에 접촉열 전달 억제를 위해 dacron screen, tissu-glass와 같은 spacer를 사용하여 구성하고 있다. MLI 최외곽층의 경우, 전도성을 확보하기 위해 MLI 외피에 ITO(Indium Tin Oxide) 처리를 하기도 한다. 참고로 MLI 제작형태는 그림 2와 같다[6].

CFRP 패널 단독으로 1차 측정을 하고, CFRP 패널 위에 MLI를 씌웠을 때와 copper 재질의 mesh 타입 스크린

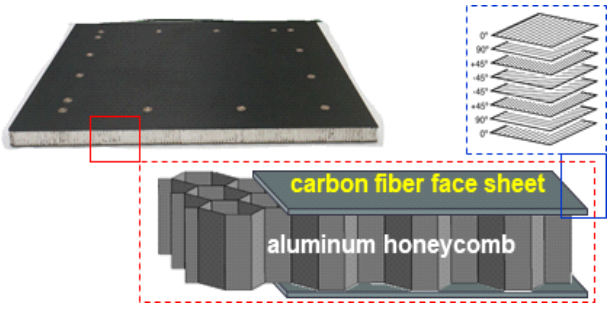

그림 1. 탄소섬유강화플라스틱 구성
Fig. 1. CFRP configuration.

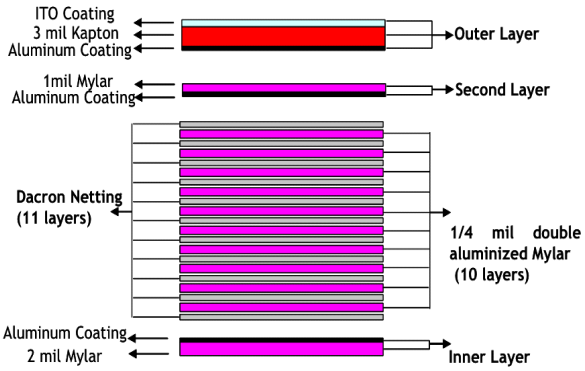

그림 2. 다층박막절연재 구성[6]
Fig. 2. MLI configuration[6].

을 패널 위에 놓고 그 위에 MLI를 설치했을 때 각각 측정하였다. 표 1은 차폐효과 측정대상에 대해 설명하고 있으며, 측정시편의 구성은 그림 3과 같다.

표 1. 차폐효과 측정대상
Table 1. Test sample summary.

Type	Material	Thickness	Matrix
CFPR Panel(1)	M55J	0.88 mm	Epoxy
CFRP Panel(2)	T700G	1.219 mm	Epoxy
MLI	Vacuum deposited aluminum kapton	0.125 mm	-
RF Screen	Copper mesh	80 μm (diameter) 965 μm (opening)	-

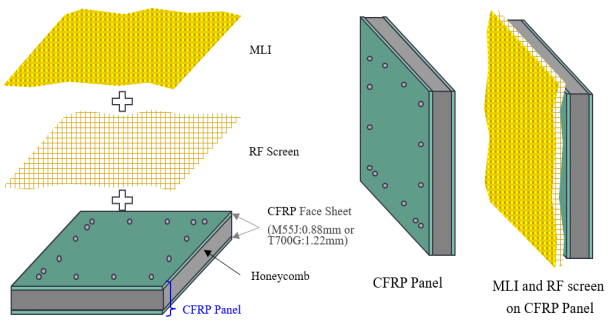

그림 3. 차폐효과 측정시편 구성
Fig. 3. SE test sample configuration.

3-2 측정 셋업

차폐효과 측정은 전자파 챔버에서 수행되었으며, 자유공간에서의 차폐측정 방법을 바탕으로 하였다[4].

전기장에 대한 차폐효과는 그림 4의 구성으로 측정하였다. 송신안테나와 수신안테나를 챔버 내부에 설치하여 측정샘플 설치 전과 후의 전력의 크기를 비교하여 차폐효과 성능을 확인하였다. 자유공간에서의 측정방법은 측정 샘플을 시험치구에 맞게 가공하거나 특별한 장치가 필요치 않으며, 일반적인 전자파 챔버에서 쉽게 측정이 가능한 방법이다. 하지만 측정샘플의 크기가 충분히 크기 않을 경우 송신안테나에 방사되는 전자파가 회절되어 수신안테나에 도달하게 될 수도 있다. MIL-STD-285 규격에서 제안하고 있는 방법과 비교했을 때 정밀한 측정결과를 기대하기 어려울 수 있으나, 특정 재료 고유의 특성이 아닌 위성 구조체의 특성을 고려해서 측정하고자 할 때에는 보다 쉽게 접근할 수 있는 측정 방법이다.

자기장에 대한 차폐효과는 근거리장에서 두 개의 작은 루프안테나를 이용하여, 루프안테나 면을 측정샘플과 평행하게 배치하여 측정샘플 설치 전과 후의 자기장 크기를 비교함으로써 확인하였다. 측정은 MIL-STD-461 RS101 시험규격의 calibration 방법으로 진행하였다. 측정에 이용된 루프안테나는 RS101 시험 전용 안테나로, RS101 시험 규격에서 요구하는 송수신 루프간 이격거리(5 cm)가 유지되도록 구성되어 있어 송신 루프는 측정샘플에서 5 cm 거리에 설치하였고, 수신 루프는 가능한 측정샘플에 근접하게 설치하였다. 그림 5는 자기장에 대한 차폐효과

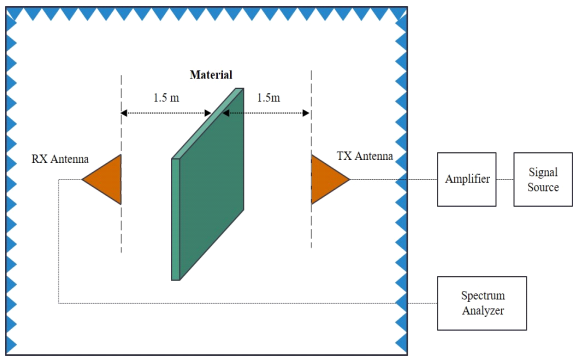

그림 4. 전자파챔버에서의 차폐효과 측정셋업
Fig. 4. SE measurement setup in semi-anechoic chamber.

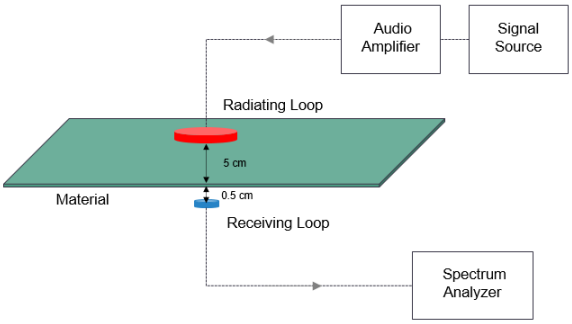

그림 5. 자기장에 대한 차폐효과 측정 셋업
Fig. 5. SE measurement setup of magnetic field.

측정 셋업을 보여준다.

대부분의 위성은 2 GHz(S-band) 대역에서 위성 운용을 위한 커맨드 및 텔레메트리 데이터 통신을 사용하고 8 GHz(X-band) 대역에서 위성 탑재체 데이터 송신을 사용하고 있어서 전기장에 차폐효과는 위성 안테나의 주요 사용 주파수 대역인 2 GHz부터 8 GHz까지 측정범위로 선정하였으며, 자기장에 대한 특성은 수 kHz 이하의 주파수 대역이 주요하지만, 측정장비가 허용하는 최대주파수(100 kHz)까지를 측정범위로 정하였다.

전기장에 대한 차폐효과를 측정할 때는 수직편파와 수평편파 각각의 특성을 확인해야 하지만, 본 논문에서는 위성에서 발생 가능한 전자파노이즈 환경을 고려한 것이며, 이 경우 전자장비에 의한 랜덤 노이즈는 편파의 개념을 적용하기 어렵고, 또한 수직편파 전기장이 상대적으로 더 크게 나타나므로 수직편파에 대해서만 차폐효과를 측정하였다. 자기장에 대해서는 루프안테나의 루프를 기준으로 동축(coxial) 방향과 동면(coplanar) 방향에 대한 차폐효과 측정이 이루어져야 하지만, 송수신 루프 안테나 거리가 매우 짧아 자기장 세기가 크게 나타나는 동축 방향에 대한 차폐효과만 측정하였다.

Ⅳ. 측정결과 및 분석

4-1 전기장에 대한 차폐효과 측정 결과 분석

이론상 차폐효과는 반사손실, 흡수손실 및 매질 내에서의 다중반사 손실의 합으로 나타낸다. 차폐효과의 가장 간단한 해석에 적용할 수 있는 Schelkunoff의 전송선 이론을 통한 참고문헌 [7]의 계산식에 따르면 각 손실항은 차폐물의 두께와 전기전도도, 투자율의 함수로 구성되므로 관련 정보가 있다면 간단하게 차폐특성을 계산할 수 있다. 측정샘플이 자기특성을 갖는 성분이 아니므로 투자율은 1로 나타낼 수 있으며, 전기전도도를 알기 위해서 CFRP 패널의 저항을 측정하여 식 (2)를 통해 전기전도도를 계산하였다.

$$R_S = R_m\left(\frac{w}{l}\right),\ \rho = R_S \times t,\ \sigma = \frac{1}{\rho},\ \sigma_r = \frac{\sigma}{\sigma_{CU}} \tag{2}$$

R_m은 측정된 저항값[Ω], R_S는 표면저항값[Ω/m], w는 너비[m], l은 길이[m], t는 두께[m], ρ는 체적저항[Ω m], σ는 전기전도도[S/m], σ_{cu}는 구리의 전기전도도[S/m], σ_r은 구리 기준 상대전기전도도[S/m]를 나타낸다.

측정 샘플인 M55J CFRP 패널의 저항값은 0.1 Ω에서 1 Ω 사이에서 측정되었으며, 전기전도도는 1,000~8,500 [S/m] 사이로 나타났다. 이 값을 기준으로 식 (3)의 관계식을 통해 차폐효과 특성을 계산할 수 있다[7].

$$\begin{aligned} R_{dB,Plane-wave} &= 108.1 - 10\log\left(\frac{\mu_r f_{MHz}}{\sigma_r}\right) \\ R_{dB,NF} &= 141.7 - 10\log\left(\frac{\mu_r f_{MHz}^3 r_{[m]}^2}{\sigma_r}\right) \\ A_{dB} &= 1{,}314 \times t_{[cm]} \times \sqrt{f_{MHz}\mu_r\sigma_r} \end{aligned} \tag{3}$$

한편, M55J CFRP 패널의 구조형상을 살펴보면, 패널 위에 전자장비를 설치하기 위한 인서트가 설치되어 있는데 원통형 구성으로 패널을 관통하여 오픈되어 있는 상태이다. 실제 차폐효과는 개구부 형태에 따라 크게 감쇄될 수 있으므로 식 (4)의 관계식으로 직경 10 mm의 원형 개구부가 있는 경우에 대한 차폐효과를 계산하였다[7].

$$SE_{dB} = 99 - 20\log(Lf_{MHz}) + 30\left(\frac{d}{L}\right) \tag{4}$$

L은 원형 개구부의 직경[mm], d는 깊이[mm]를 나타내며 23 mm이다. 또한 측정 안테나의 크기(D: 0.28 m)를 기준으로 $2D^2/\lambda$의 원거리장 조건을 만족하지 못한 3.5

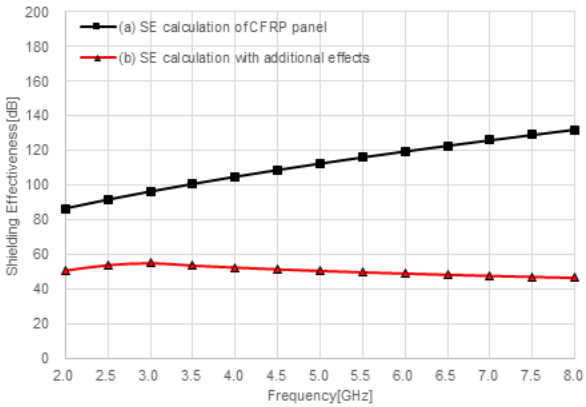

그림 6. M55J CFRP panel에 대한 차폐효과 계산결과
Fig. 6. SE calculation results of M55J CFRP panel.

GHz 이상의 주파수에서는 식 (3)에서 근거리장의 반사손실 계산식을 반영하였다. 계산된 차폐특성은 그림 6에서 보여주고 있다. 그림 6의 (a)는 식 (3)을 통해 계산된 plane wave 조건에서의 차폐효과이며, (b)는 식 (3)의 개구부가 없는 경우의 차폐효과와 식 (4)를 통해 계산된 15개의 원형 개구부로 인한 차폐효과 중 더 낮은 차폐 특성을 선택한 결과로, 2 GHz부터 8 GHz 주파수 대역에서 40 dB에서 50 dB 정도의 차폐효과 특성이 계산되었다.

그림 4의 셋업으로 자유공간으로 구성된 전자파 챔버에서 측정샘플 구성에 따라 측정한 차폐효과 특성 측정값을 그림 7부터 그림 9까지 나타내었다.

그림 7은 탄소섬유의 특성이 다른 M55J 및 T700G 패널과 MLI 및 RF 스크린에서 각각 측정된 차폐효과를 보여준다. CFRP 패널의 차폐특성은 유사하게 나타났으며, copper mesh 타입의 스크린의 경우 20~30 dB의 차폐도를 갖는 것으로 나타났다. 절연재 내부에 알루미늄 층이 형성되어 있는 MLI의 경우에도 20~40 dB의 우수한 차폐특성을 갖는 것을 확인할 수 있었다.

그림 8과 그림 9는 각각 M55J CFRP 패널과 T700G CFRP 패널에 대해 구성별 차폐성능에 대한 측정결과를 보여준다. MLI와 RF 스크린을 CFRP 패널 위에 설치하여 측정한 차폐효과가 각 매질의 독립적인 차폐성능의 합으로 나타나지 않음을 알 수 있는데, 이는 각 매질의 임피던스 특성에 의해 반사와 흡수되는 특성이 단층으로 구성될 때와 다층으로 구성될 때 달라지기 때문이다[3].

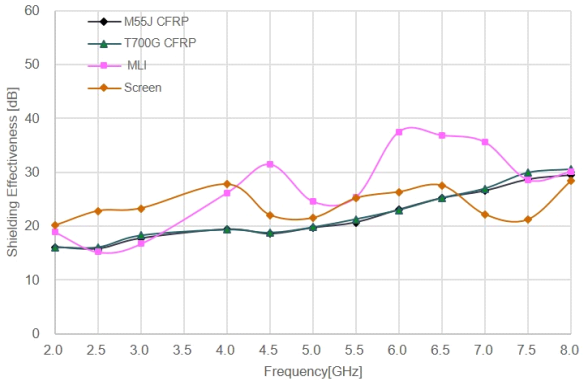

그림 7. 위성구조체 적용재에 대한 차폐특성 측정결과
Fig. 7. SE measurement results of spacecraft structural parts.

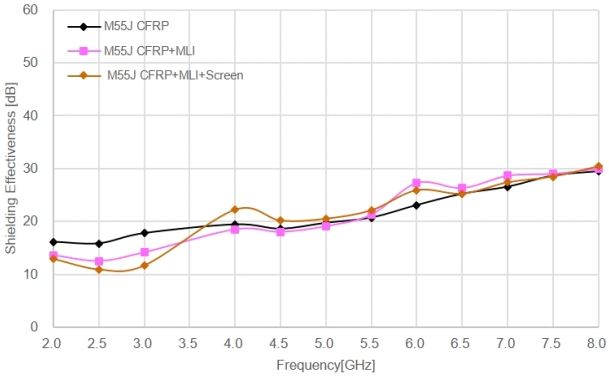

그림 8. M55J CFRP 패널 구성에 따른 차폐특성 측정결과
Fig. 8. SE measurement results for M55J CFRP configuration.

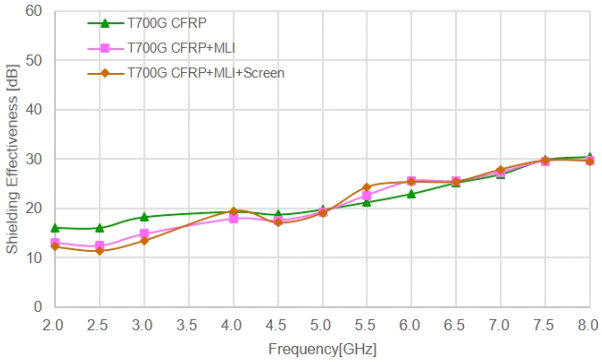

그림 9. T700G 패널 구성에 따른 차폐특성 측정결과
Fig. 9. SE measurement results for T700G CFRP configuration.

4 GHz까지의 측정결과를 보면 CFRP 패널 위에 MLI와 스크린을 설치한 형상에서 측정한 차폐효과가 CFRP 패널 단독으로 측정한 결과보다 낮게 나타나고 있는데, 그 원인은 측정샘플의 크기가 충분히 크지 않아 발생할 수 있는 회절 효과에 의한 영향이 크기 때문으로 판단된다. 송신 안테나의 3 dB 빔폭에 해당하는 면적과 시편의 크기를 비교했을 때 낮은 주파수에서는 두 배 이상 차이가 있다. 또한 측정샘플의 균일하지 못한 재질 특성 및 MLI와 RF 스크린의 설치 형상이 패널 면에 밀착되는 것이 아닌 걸쳐져 있어 일정한 면을 형성하지 못한 측정 셋업이 결과에 영향을 끼쳤을 것으로 판단된다.

Honeycomb 구조나 MLI, RF screen과 같이 다양한 물질이 다층으로 구성되어 있는 측정 샘플에 대해 측정된 차폐효과를 식 (3)의 이론식으로만 검증하는 것은 한계가 있으며, 균일하지 못한 재질 특성이나 측정 환경에 의한 특성 변화 등이 고려되어야 한다. 그림 6의 이론에 의한 계산값은 전도성 특성을 갖는 CFRP facesheet 만을 고려한 것으로, M55J CFRP 패널에 대하여 원형 개구부를 고려한 차폐효과 계산값과 CFRP 패널 단독으로 측정한 결과를 비교했을 때 무시할 수 없는 큰 차이를 보이고 있으나, 개구부를 고려하지 않은 계산값보다는 실질적인 조건이라는 것을 확인할 수 있다. 이론에 의한 계산값과 측정값의 차이는 앞서 언급한 것과 같이 회절 효과나 전자파 챔버 내 측정환경에서 반사된 전파에 의한 효과에 의한 영향과 송수신 안테나의 개구면을 기준으로 계산했을 때 충분한 원거리장이 보장되지 못한 영향으로 판단된다.

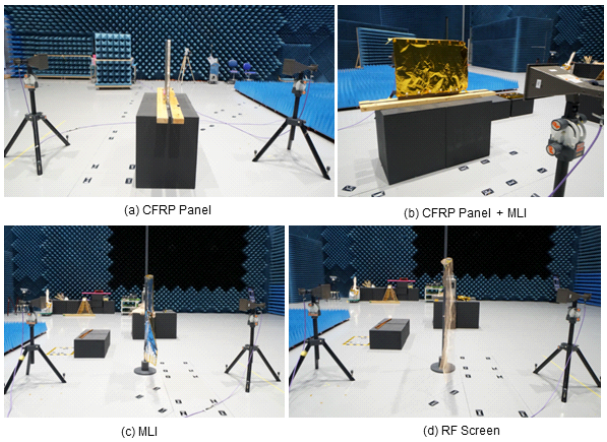

그림 10 전자파챔버에서 수행한 전기장 차폐측정
Fig. 10. SE test configuration for plane wave in anechoic chamber.

자유공간방법을 이용한 차폐효과 특성 측정은 그림 10과 같이 전자파 챔버에서 이루어졌다. 그림 10은 위성 적용재에 대한 전기장 차폐효과 특성을 측정하기 위한 셋업으로, (a)는 CFRP 패널만을 대상으로 측정한 구성이고, (b)는 (a)의 CFRP 패널에 MLI를 설치한 상태에서 측정한 것이다. 그림 10의 (c)와 (d)는 MLI와 RF screen 각각의 차폐효과 특성 측정 형상이다.

4-2 자기장에 대한 차폐효과 측정 결과 분석

MLI를 포함한 CFRP 패널의 차폐효과를 그림 5의 구성으로 자기장을 기준으로 100 kHz까지 측정하였으며, 측정결과를 그림 11과 그림 12에 나타내었다.

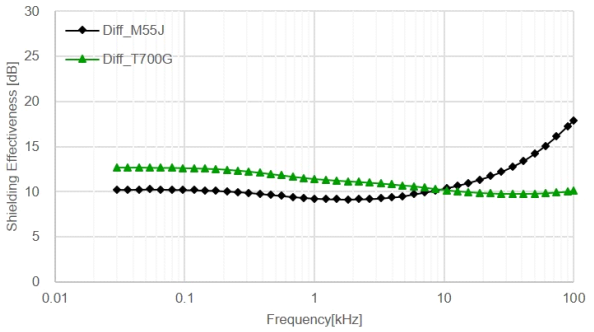

그림 11. CFRP 패널에 대한 자기장 차폐특성 측정 결과
Fig. 11. SE measurement results of CFRP panels for magnetic field.

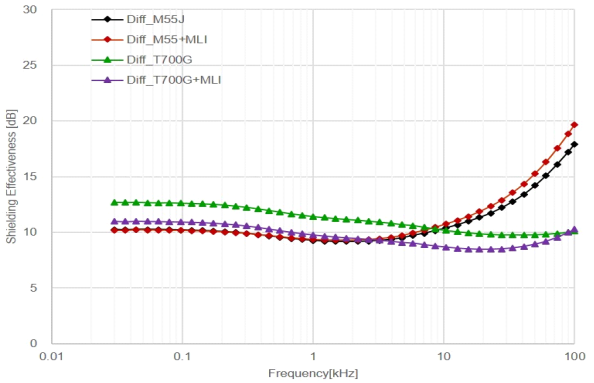

그림 12. 위성 구조체 적용재에 대한 자기장 차폐특성 결과
Fig. 12. SE measurement results of spacecraft structural parts for magnetic field.

그림 11은 CFRP 패널 타입에 따른 자기장 차폐효과 측정결과로, 패널을 구성하는 Al. honeycomb의 구성과 두께에 의해 극저주파수 대역에서 약간의 차폐특성을 갖는 것으로 나타나고 있으나, 전도성 특성이 더 좋은 M55J CFRP 패널의 경우 주파수가 높아질수록 표피두께(skin depth)가 작아져서 10 kHz 이상에서는 T700G CFRP 패널보다 더 높은 차폐효과를 보이고 있다. 1 kHz 이하에서 전기전도도가 낮은 T700G CFRP 패널의 차폐성능이 약 2 dB 정도 높게 나타나고 있는데, 차이는 T700G 패널 두께에 기인한 것으로 판단된다. 그림 12는 CFRP 패널에 MLI를 설치한 후에 자기장 차폐효과 특성을 측정한 결과로, MLI와 함께 사용했을 때 차폐효과가 개선된 것은 아니었다. 그림 11의 결과와 마찬가지로 극저주파 대역에서는 T700G CFRP 패널의 차폐성능이 더 높게 나타나고 있다. 다만 MLI를 포함했을 때에는 MLI를 구성하는 금속재질(Al) 층에 의한 특성으로 M55J 패널에서 보이는 특성과 유사하게 나타나고 있지만, 주파수가 올라갈수록 표피효과에 의한 차폐성능은 차이를 보이고 있다. 그림 13은 전자파챔버에서 수행된 자기장에 대한 차폐효과 특성 측정 사진이다. 패널의 윗면에 송신용 루프안테나를 놓고 수신용 루프안테나는 패널의 밑면에 설치하여 송수신용 루프안테나의 루프면이 평행하도록 셋업하였다.

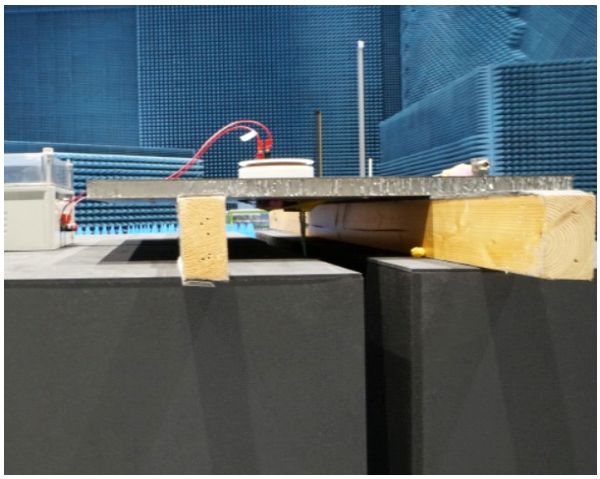

그림 13 전자파 챔버에서 수행한 자기장 차폐측정
Fig. 13. SE test configuration for magnetic field in anechoic chamber.

Ⅴ. 결 론

차폐효과는 위성의 구조체나 외장재에 적용되는 조건과 설치 형상에 따라 달라질 수 있으므로 본 논문에서는 궁극적으로는 MLI로 마감 처리된 위성 구조체의 완전한 형상이 갖는 차폐특성을 분석하기 위해 위성 적용재에 관한 최소한의 차폐효과를 확인하고자 하였다. 전자파챔버에서 자유공간 측정법을 이용하여 위성구조체에 대한 특별한 성형 없이 간단하게 구성된 측정환경을 통해 측정 대상체에 대한 차폐효과를 측정하였으며, 측정결과 CFRP 패널이 2 GHz에서 8 GHz 주파수 대역에서 최소 10~30 dB의 차폐특성을 갖는 것을 확인하였다. 또한 자기장 측정을 통해서 저주파 대역에서도 10~20 dB의 차폐효과가 있음을 확인할 수 있었다. 본 논문 결과를 통해 그동안 위성시스템에 대한 전자파적합성 해석 시 예상값으로만 제시하였던 구조물 및 MLI에 의한 차폐성능을 구체적인 수치로 제시할 수 있으며, 연속으로 겹쳐져 있는 차폐재의 성능이 개별 차폐재 성능의 단순 합이 아님을 확인함으로써 위성의 차폐설계나 전자파 해석에 유의미한 조건을 제시할 수 있을 것이다.

향후에는 표준 측정방법을 통해 위성 적용재에 대한 정확한 차폐특성을 확인하여 본 논문에서 제시한 측정방법 및 결과와의 비교 연구를 통해 개선된 측정법에 관한 연구를 지속할 예정이며, 측정 주파수를 확장하여 수십 MHz 대역부터 40 GHz 대역까지 차폐효과 측정을 통해 위성 전자장비의 동작에 의해 발생하는 전기장노이즈 및 수십 GHz의 RF 송수신에 의해 발생하는 전기장에 의한 차폐특성도 확인할 계획이다. 아울러 EM simulation 해석을 통한 이론적인 검증 연구도 진행할 예정이다.

References

[1] A. Emmanuel, J. Raghavan, "Influence of structure on radiation shielding effectiveness of graphite fiber reinforced polyethylene composite," *Advances in Space Research*, vol. 56, no. 7, 1288-1296, Jul. 2015.

[2] S. I. Heo, J. C. Yun, K. S. Oh, and K. S. Han, "Electrical and the mechanical properties of graphite particle/carbon

fiber hybrid conductive polymer composites," *Composites Research*, vol. 19, no. 2, pp. 7-12, Apr. 2006.

[3] V. P. Kodali, *Engineering Electromagnetic Compatibility: Principles, Measurements, and Technologies, and Computer Models*, New York, NY, IEEE Press, 1996.

[4] C. Morari, I. Balan, "Methods for determining shielding effectiveness of materials," *Electrotechnica, Electronica, Automatica*, vol. 63 no. 2, pp. 126-136, 2015.

[5] D. J. Ra, B. Yoon, and H. J. Kang, "Effect of carbon fiber orientation on the electrical conductivity of epoxy/carbon fiber composites," *Polymer-Korea*, vol. 23, no. 5, pp. 655- 661, 1999.

[6] B. S. Hyun, H. K. Kim, J. J. Lee, and J. M. Choi, "Investigation on thermal analysis method for multi-layer insulation using thermal vacuum test data," in *2005 the Korean Society of Mechanical Engineers Conference*, Muju, Nov. 2005, pp. 167-170.

[7] R. W. Evens, "Design guidelines for shielding effectiveness, current carrying capability, and the enhancement of conductivity of composite materials," *NASA Contractor Rep.* 4784, NASA, Washington, DC, Aug. 1997.

김 태 윤 [충남대학교/박사과정]

https://orcid.org/0000-0002-8700-6960

1999년 2월: 단국대학교 전자공학과 (공학사)

2001년 2월: 단국대학교 전자공학과 (공학석사)

2001년 3월～현재: 한국항공우주연구원 선임연구원

2013년 3월～현재: 충남대학교 전파정보통신공학과 박사과정

[주 관심분야] EMC, ESD, 위성시스템, RF 해석

이 재 현 [충남대학교/교수]

https://orcid.org/0000-0001-7697-3982

1978년 2월: 인하대학교 전자공학과 (공학사)

1985년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자과 (공학석사)

1993년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자과 (공학박사)

1991년 2월～2001년 2월: 한국전자통신연구원 책임연구원

2001년 2월～현재: 충남대학교 전파정보통신공학과 교수

[주 관심분야] EMC, 위성통신 시스템 및 MW 부품, MW 신호처리 소자