



J. Korean Soc. Aeronaut. Space Sci. 49(10), 841-847(2021)

DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2021.49.10.841

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

## 저밀도 표면필름 구리망의 비행체 적용 가능성 연구

현세영<sup>1</sup>, 김용태<sup>2</sup>, 김상용<sup>3</sup>, 김봉규<sup>4</sup>

## A Study on Applicability of Low-Density Surface Film Copper Mesh for Aircraft

Se-Young Hyun<sup>1</sup>, Yong-Tae Kim<sup>2</sup>, Sang-Yong Kim<sup>3</sup> and Bong-Gyu Kim<sup>4</sup>

Agency for Defense Development

## ABSTRACT

In this paper, the applicability of the low-density surface film copper mesh for aircraft applications have been analyzed. Recently, low-density surface film copper mesh is developed to reduce weight and cost compared with traditional surface film copper mesh. In order to apply low-density surface film copper mesh to aircraft, it is needed to analyze its electromagnetic effects as well as structural integrity with sandwich panels to prevent pinholes. The structural integrity and electromagnetic characteristics have been analyzed for 2 samples of low-density surface film copper mesh and 1 sample of surface film copper mesh. To review the applicability of the low-density surface film, it is combined with sandwich composite panel to confirm pinhole effects. The low-density surface film has been modeled as a periodic structure and analyzed with 3D electromagnetic simulation tool. The simulation results has been verified through measured electromagnetic transmission results using free space measurements. From the results, it will be possible to use these results for the analysis and the applicability of low-density surface film copper mesh for aircraft.

## 초 록

본 논문에서는 저밀도 표면필름 구리망에 대한 비행체 적용 가능성을 분석하였다. 최근 기존 표면 필름 구리망에서 중량 및 비용을 절감할 수 있도록 표면 필름의 두께를 낮춘 저밀도 표면 필름 구리망이 개발되었다. 이러한 저밀도 표면필름 구리망을 비행체에 적용하기 위해서는 샌드위치 구조에서의 핀 홀 방지 효과와 같은 제작성 확인과 함께 적용 시 전자기 영향성에 대한 분석이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 저밀도 필름 구리망 2종과 기존 비행체 적용 구리망 1종에 대해 제작성 및 전자기 영향성을 분석하였다. 표면 구리망에 대한 제작성은 샌드위치 복합재와 표면 구리망을 결합하여 핀 홀 방지효과를 확인하였다. 전자기 영향성 분석은 3D 전자기파 시뮬레이션을 통해 각 샘플에 대한 주기구조를 이용하여 해석하였으며, 자유공간 측정방법을 이용한 저밀도 필름 구리망의 전자기파 투과특성 측정결과를 통해 시뮬레이션 결과가 유효함을 확인하였다. 위 결과로 비행체 적용이 필요한 저밀도 표면필름 구리망에 대한 해석 및 비행체 적용 가능성을 판단할 수 있다.

**Key Words** : Low-density Surface Film(저밀도 표면필름), Electromagnetic Interference(전자파 장애), Copper Mesh(구리망)

† Received : February 10, 2021    Revised : September 12, 2021    Accepted : September 27, 2021

<sup>1-4</sup> Researcher

<sup>1</sup> Corresponding author, E-mail : syhyun@add.re.kr

© 2021 The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences

## I. 서 론

일반적으로 민간 항공기는 운항 중 낙뢰를 연간 평균 1~2회 정도 경험하는 것으로 알려져 있다[1]. 이러한 낙뢰피격 영향은 크게 직접영향(direct effect)과 간접영향(indirect effect)으로 나눌 수 있으며, 낙뢰의 직접영향은 물리적 손상 및 점화 전파, 국부적 발열에 의한 연소 등을 발생시킨다. 또한 간접영향은 낙뢰에 의해 유도된 전류 및 전자기장에 의해 비행체 내부의 전자 기기 및 제어 장비 등에 손상 또는 오작동을 발생시키게 된다[2-4]. 현재 개발되는 항공기에는 기체구조 경량화를 위한 복합재 사용이 크게 증가하고 있으며, 이는 이전 항공기에 사용되었던 금속 구조물에 비해 전기전도도가 떨어짐으로 낙뢰로부터 항공기를 보호하기 위한 보완 설계 적용이 필수적이다. 도체로 이루어진 구리망은 이러한 낙뢰 위협으로부터 비행체를 보호하기 위해 사용되는 전자기파 차폐 방법 중 하나이다. 특히 표면 필름 구리망은 복합재 보호를 위해 최외곽면에 부착되며, 필름형태로 되어있기 때문에 쉽게 적용이 가능하다.

최근에는 기존 표면 필름 구리망에서 중량 및 비용을 절감할 수 있도록 표면 필름의 두께를 낮춘 저밀도 표면 필름 구리망이 개발되었다. 이러한 저밀도 표면 필름 구리망을 비행체에 적용하기 위해서는 기존 표면 필름 구리망과 비교하여 샌드위치 구조에서의 핀 홀 방지 효과와 같은 제작성 확인 및 적용 시 외부 전자기 환경 영향성에 대한 분석이 필요하다.

따라서 본 논문에서는 저밀도 표면 구리망에 대한 비행체 적용 가능성을 확인하기 위해 상용 저밀도 표면 구리망 2종과 기존 비행체에 적용되었던 표면 구리망 1종에 대한 제작성 및 전자기 영향성을 비교 분석하였다. 표면 구리망에 대한 제작성은 샌드위치 복합재와 표면 구리망을 결합하여 핀 홀 방지효과를 확인하였으며, 각 구리망에 대한 전자기 영향성을 비교 분석하였다. 전자기 특성 해석방법으로는 3D 전자기파 해석 툴을 이용하여 저밀도 표면필름 구리망에 대한 전자기파 투과특성 시뮬레이션을 수행하였으며, 자유공간 측정방법을 이용하여 실제 전자기파 투과특성을 측정하여 비교하였다.

## II. 본 론

Figure 1은 일반적으로 사용되는 복합재 구성을 보여준다. 그림에서 구리망은 도체로 이루어져 있으며, 복합재를 낙뢰로부터 보호할 수 있도록 외각면에 사용된다. 또한 구리망에는 얇은 막 형태의 레진 필름이 적용되어 있어, 복합재 표면 보호가 가능하다. 이러한 표면필름 구리망에 대한 비행체 적용 가능성을 알아보기 위해서는 기존 복합재와의 구조적 적용 가능성과 전자기파 영향성 분석이 필요하다.

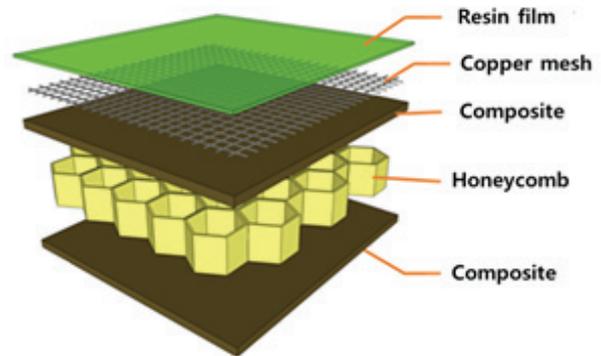


Fig. 1. Typical multi-layered composite material with copper mesh and film

### 2.1 저밀도 표면필름 구리망의 제작성 검토

저밀도 표면필름 구리망은 얇은 레진 필름이 적용되기 때문에 샌드위치 복합재 구조에 필름 적용 시 핀 홀 발생 가능성이 있다. 따라서 공력에 유리한 비행체 표면을 확보하기 위해서는 핀 홀 방지효과를 확인하여야 한다. 본 논문에서는 기존에 사용되었던 표면필름 1종과 저밀도 표면필름 2종을 비교분석하였으며, Table 1에 각 샘플에 대한 면적 중량 및 중량비, 기체적용 시 예상되는 중량을 나타내었다. 여기서 Sample-1은 기존 표면필름이며, Sample-2와 -3은 저밀도 표면필름 구리망이다. Fig. 2는 샌드위치 복합재 구조에 각 샘플을 적용한 후 핀 홀 발생 상태를 나타낸 그림이다. 핀 홀 발생 상태를 보면 Sample-1의 경우 핀 홀이 발생하지 않았으며, Sample-2는 일부 핀 홀 발생, Sample-3은 다수의 핀 홀이 발생하는 것을 알 수 있다. 저밀도 표면필름 구리망의 경우 표면필름이 매우 얇고 구리망과의 면적 중량비도 낮기 때문에 핀 홀이 발생된 것으로 판단되며, 향후 기체적용 예상중량과 구리망의 형태, 면적 중량비 등을 고려하여 적절한 저밀도 표면 구리망을 기체에 적용해야 할 것으로 판단된다.

Table 1. Parameters of samples

No.	Areal Weight (Film)	Areal Weight (Mesh)	Weight Ratio (Film /Mesh)	Estimated Weight
1	0.045 lb/ft <sup>2</sup> (219 g/m <sup>2</sup> )	0.015 lb/ft <sup>2</sup> (73 g/m <sup>2</sup> )	3	16.80 Kg
2	0.016 lb/ft <sup>2</sup> (77 g/m <sup>2</sup> )	0.012 lb/ft <sup>2</sup> (60 g/m <sup>2</sup> )	1.3	7.88 Kg
3	0.020 lb/ft <sup>2</sup> (97 g/m <sup>2</sup> )	0.022 lb/ft <sup>2</sup> (107 g/m <sup>2</sup> )	0.9	11.74 Kg

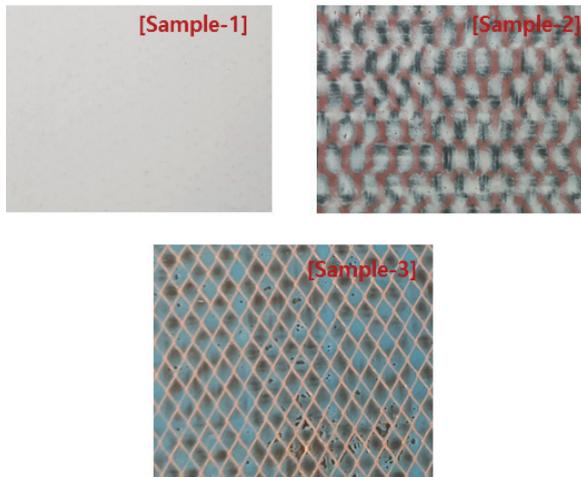


Fig. 2. Microscopic image of 3 samples laminated with sandwich panels

## 2.2 저밀도 표면필름 구리망의 전자기적 모델링 및 해석

### 2.2.1 저밀도 표면필름 구리망의 전자기적 모델링

Figure 3은 표면필름 구리망의 3가지 샘플을 보여 준다. Sample-1과 Sample-3은 마름모 형태의 도체가 주기적으로 배열된 일반적인 형태의 구리망이며, Sample-2는 육각형 형태의 구리망이 사용되었다. 저밀도 표면필름은 이와 같은 구리망이 필름 내에 포함된 구조이다. 본 논문에서는 저밀도 표면 필름 구리망의 전자기적 투과특성 결과를 얻기 위해 상용 3D EM 시뮬레이션 툴인 HFSS의 Floquet 모드를 이용하였으며, Fig. 4와 같이 각 샘플의 구리망의 주기적 구조를 이용하여 단위 셀(unit cell)을 구성하여 해석하였다. 저밀도 표면 필름 구리망은 이 단위 셀이 반복하여 나타나는 주기구조라고 생각할 수 있으며, 이에 대한 주기 구조 경계면(periodic boundary condition, PBC)을 외각면에 설정하게 된다[5]. 이러한 해석방법

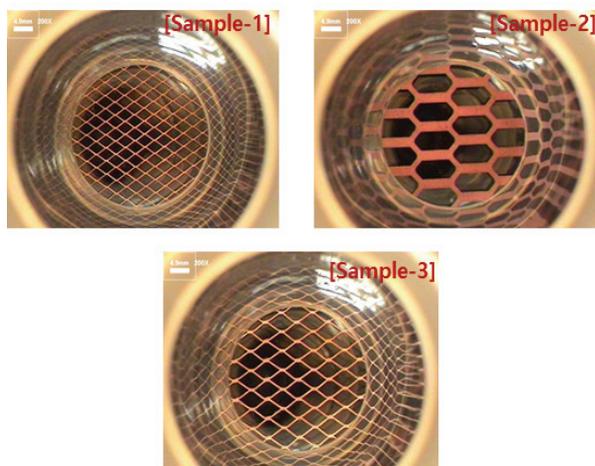


Fig. 3. Microscopic image of 3 samples

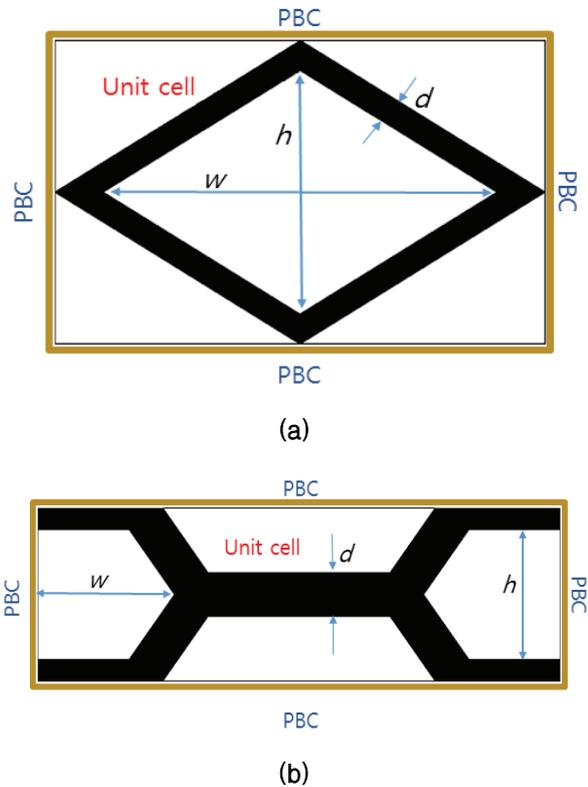


Fig. 4. Unit cell and periodic boundary condition (a) sample-1 and -3 (b) sample-2

Table 2. Parameters of samples

Parameters	Sample-1	Sample-2	Sample-3
$d$ (mm)	0.1	0.5	0.2
$w$ (mm)	1.7	1.6	2.2
$h$ (mm)	1.1	1.5	1.4

은 무한배열 주기구조 해석에 이용되며, 해석시간이 짧고 여러 가지 주기 구조에 대해 해석이 용이하다. HFSS에서 제공하는 구리의 전도도(conductivity)는  $5.8e7$  [S/m]이며, mesh는 생성 시 delta S를 0.05로 설정하고 HFSS의 adaptive mesh 기능을 이용하여 분할하였다. Table 2는 각 표면필름 구리망 샘플에 대한 파라미터 들을 나타낸다. 여기서  $d$ 는 구리망의 두께,  $h$ 와  $w$ 는 각 구리망의 간격을 나타내며, 필름의 유전율을 2, 두께는 0.15 mm로 각각 설정하였다. 유전율은 각 샘플 제작회사에서 제공하지 않았기 때문에 일반적인 레진 유전율 2~5 사이에서 결정한 값이다.

### 2.2.2 저밀도 표면필름 구리망 시뮬레이션 결과

저밀도 표면필름 구리망에 대한 해석 주파수는 8~12 GHz이며, Table 3과 같이 MIL-STD-464C의 외부전자기 환경요구조건 중 무인항공기 비행체에 해

당하는 항목에서 전계강도가 가장 높은 주파수 범위로 설정하였다[6,7]. 전자파 입사방향은 가장 전자파 투과가 많이 일어날 수 있는 조건인 수직입사를 가정하였으며, 저밀도 표면필름 구리망에 대한 전자파 투과특성은 아래와 같이 얻을 수 있다.

$$Transmission = 20\log|T| \tag{1}$$

$$R = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}; \quad T = 1 + R \tag{2}$$

Table 3. External RF EME Requirement for UAV

Freq. Range (MHz)		Electric Field (V/m)	
		Peak	Ave.
0.01	2	88	27
2	30	64	64
30	150	67	13
150	225	67	36
225	400	58	3
400	700	2143	159
700	790	80	80
790	1000	289	105
1000	2000	3363	420
2000	2700	957	209
2700	3600	4220	455
3600	4000	148	11
4000	5400	3551	657
5400	5900	3551	657
5900	6000	148	4
6000	7900	344	14
7900	8000	148	4
8000	8400	187	70
8400	8500	187	70
8500	11000	6299	238
11000	14000	2211	94
14000	18000	1796	655
18000	50000	533	38

Figure 5는 각 편파방향에 따라 나타난 샘플들의 전자기파 투과특성 결과이다. 그림에서 E는 전계의 방향, k는 전파 진행방향을 의미한다. Fig. 5(a)의 결과로 수직편파일 때, Sample-1이 가장 낮은 투과특성을 보이며, Sample-2와 Sample-3은 유사한 투과특성을 갖는다. Fig. 5(b)의 수평편파 경우에도 수직편파와 유사하게 Sample-1이 가장 낮은 투과특성을 갖는 것으로 분석되었다. 위 결과로 수직/수평편파에 따라 구리망 사이의 간격 w 또는 h가 좁을수록 낮은 전자기파 투과특성을 갖는 것을 알 수 있다. 시뮬레이션 결과로 3가지 샘플 중 Sample-1이 수직, 수평편파에서 모두 가장 높은 전자기파 차폐효과를 나타내었다. 또한 이러한 시뮬레이션을 통해 저밀도 표면필름 구리망 선택 시 기존 복합재와의 제작성 뿐만 아니라 필름의 유전율과 두께, 구리망의 두께와 간격을 고려한 전자기적 설계가 필요한 것을 알 수 있다.

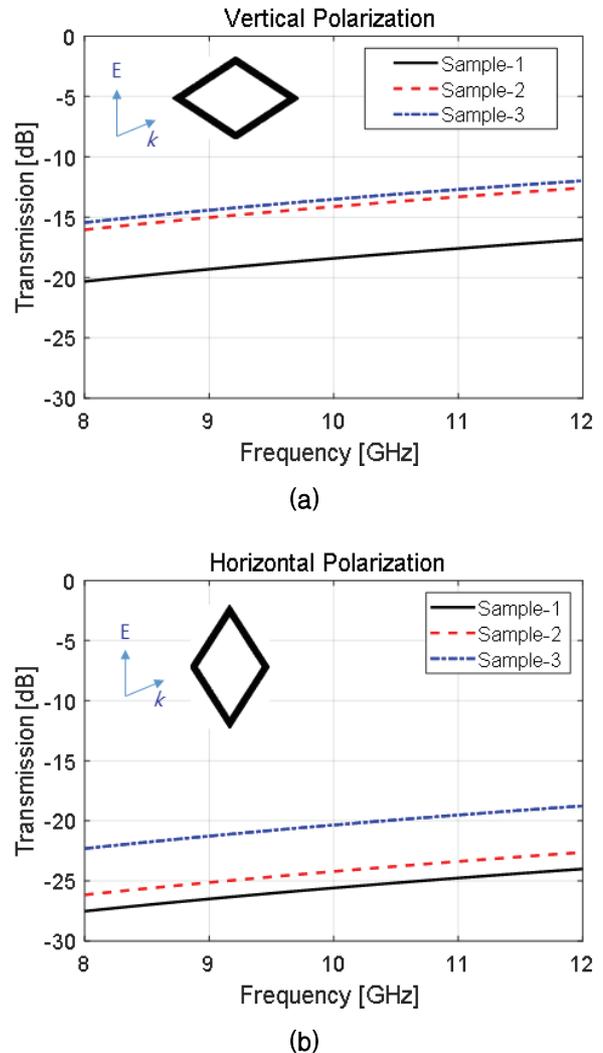


Fig. 5. Transmission characteristics of 3 samples (a) vertical polarization (b) horizontal polarization

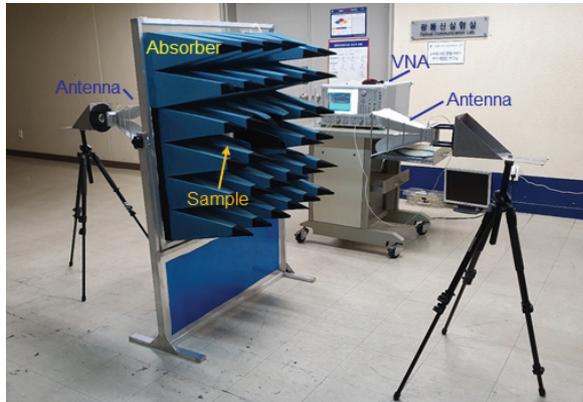


Fig. 6. Free space measurement system

## 2.3 측정 방법 및 결과

### 2.3.1 측정 방법

저밀도 필름 구리망에 대한 전자기파 투과특성 시뮬레이션 결과를 비교 분석하기 위해 본 연구에서는

Fig. 6과 같이 자유공간 측정 시스템을 구축하여 저밀도 필름 구리망에 대한 전자기파 투과특성을 측정하였다. 샘플의 크기는 20 x 20 cm로 가공하였으며, 가공된 샘플은 측정용 판 정중앙에 동일한 크기의 사각형 홀에 위치한다. 샘플 주위에는 측정용 판에 의한 전자기파 반사를 막기 위해 흡수체를 배치하였다. 측정용 샘플 양쪽에는 혼안테나(Dual ridged horn antenna, 5~18 GHz)가 위치하고 있으며, 안테나는 RF 케이블을 이용하여 네트워크 분석기(Anritsu, MS4647B)로 연결된다. 안테나 간 거리는 약 1.6 m이며, 실측전 네트워크 분석기에 대해 SOLT (Short, Open, Load, Thru) calibration을 수행하게 된다. 또한 측정에 이용된 네트워크 분석기에는 time gating 기능이 내장되어 있어 측정 시 발생하는 다중 리플을 제거하고 샘플만의 전자기파 투과 특성을 측정할 수 있다.

### 2.3.2 측정 결과

Figures 7~9는 각 샘플에 대한 전자기파 투과특성 측정 결과와 시뮬레이션 결과를 비교하였다. 측정은

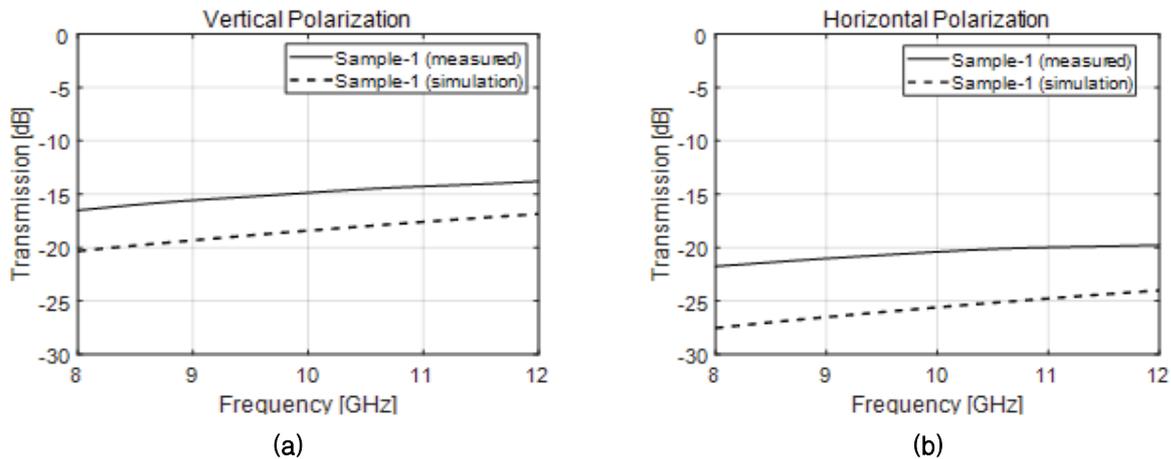


Fig. 7. Comparison of transmission characteristics between simulation and measurement (sample-1), (a) vertical polarization (b) horizontal polarization

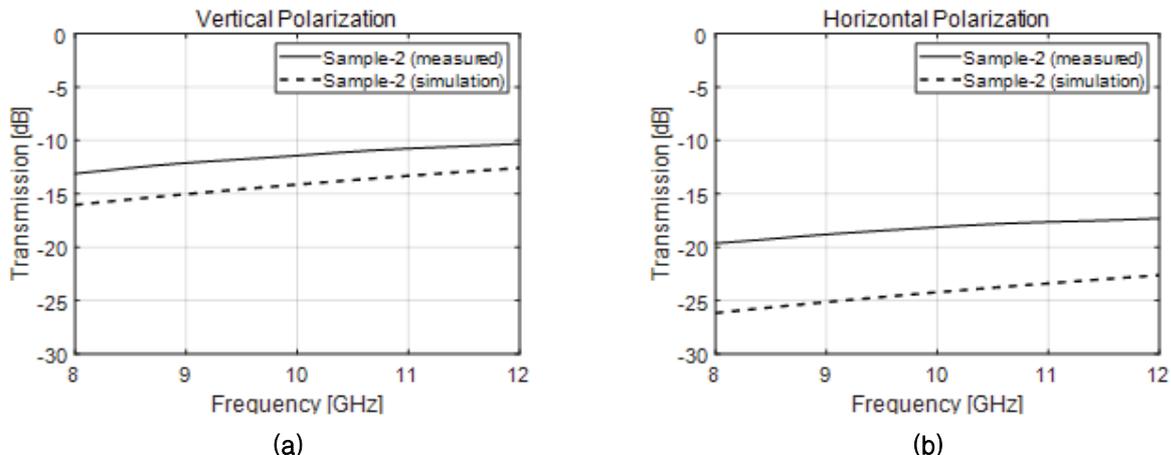


Fig. 8. Comparison of transmission characteristics between simulation and measurement (sample-2), (a) vertical polarization (b) horizontal polarization

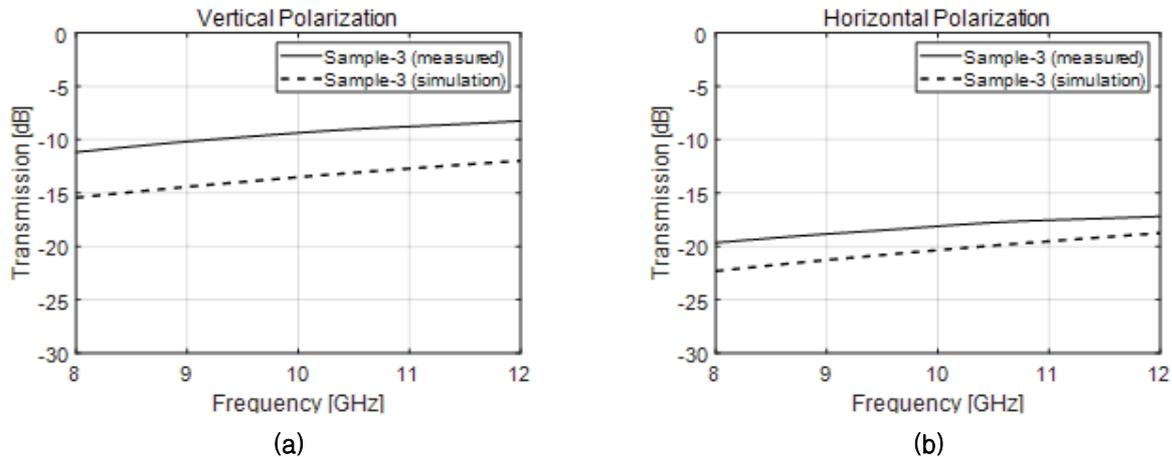


Fig. 9. Comparison of transmission characteristics between simulation and measurement (sample-3), (a) vertical polarization (b) horizontal polarization

8~12 GHz 범위에서 수행하였으며, 시뮬레이션 결과와 비교하여 2~5 dB 범위 내에서 일치함을 알 수 있다. 시뮬레이션 결과와 동일하게 전자기파 투과특성 결과는 수직 편파에서 Sample-1이 가장 낮은 투과효과를 나타내었으며, Sample-3이 가장 높은 투과를 갖는 것을 알 수 있다. 수평 편파의 경우 Sample-1이 전자기파 투과특성이 가장 낮고 Sample-2와 Sample-3은 유사한 특성을 나타내었다. 결과적으로 기존에 비행체에 적용되었던 Sample-1에 비해 Sample-2와 Sample-3이 전자기파 투과특성이 높기 때문에 교체적용 시 외부 RF 전자기환경 시험을 재수행해야 하는 문제점이 있다[7]. 따라서 저밀도 표면필름 구리망 적용 시 비행체 중량 감소에는 효과가 있지만 기존 표면필름 구리망에 비해 비행체 적용성에 문제점을 가지고 있다. 하지만 향후 논문에서 제시하는 방법을 이용하여 비행체 적용이 필요한 저밀도 표면필름 구리망에 대한 해석 및 비행체 적용 가능성을 판단할 수 있을 것으로 사료된다.

### III. 결 론

본 연구에서는 최근 개발된 저밀도 표면필름 구리망 2종과 기존에 사용되었던 표면 구리망 1종에 대해 비행체 적용 가능성을 검토하였으며, 이를 위해 기존 복합재와의 구조적 적용 가능성과 전자기파 영향을 비교 분석하였다. 저밀도 표면필름 구리망은 얇은 레진 필름이 적용되기 때문에 샌드위치 복합재 구조에 필름 적용 시 핀 홀 발생 가능성이 있다. 따라서 이에 대한 핀 홀 방지효과를 확인하여야 한다. 저밀도 표면필름 구리망의 구조 적용 가능성 시험 결과부터 기존에 비행체에 적용되었던 Sample-1의 경우 핀 홀이 발생하지 않았으며, 저밀도 표면필름 구리망 Sample-2는 일부 핀 홀 발생, Sample-3은 다

수의 핀 홀이 발생되었다. 이는 저밀도 표면필름 구리망의 경우 표면필름이 매우 얇고 구리망과의 면적 중량비도 낮기 때문에 핀 홀이 발생된 것으로 판단되며, 향후 기체적용 예상중량과 구리망의 형태, 면적 중량비 등을 고려하여 적절한 저밀도 표면필름 구리망 적용이 필요하다. 저밀도 표면필름 구리망에 대한 전자기 영향성 분석은 3D 전자기파 시뮬레이션을 통해 각 샘플에 대한 주기구조를 이용하여 해석하였다. 또한 자유공간 측정방법을 이용하여 저밀도 필름 구리망의 전자기파 투과특성을 측정하고 시뮬레이션 결과가 유효함을 확인하였다. 전자기파 투과특성 시뮬레이션과 측정 결과, 수직편파일 때 Sample-1이 가장 낮은 투과특성을 보이며, Sample-2와 Sample-3은 유사한 투과특성을 갖는다. 수평편파의 경우에도 수직 편파와 유사하게 Sample-1의 전자기파 투과특성이 가장 낮게 분석되었다. 위 결과로 각 편파에 따라 구리망 사이의 간격이 좁을수록 낮은 전자기파 투과특성을 갖는 것을 알 수 있다. 따라서 저밀도 표면필름 구리망 적용 시 기존 복합재 간 제작성, 무게뿐만 아니라 필름의 유전율과 두께, 구리망의 두께와 간격을 고려하여야 비행체 적용이 가능하다.

본 논문에서 분석된 저밀도 표면필름 구리망 2종의 경우 제작성과 전자기파 투과특성이 기존 비행체에 사용되었던 표면필름 구리망과 비교하여 적용성이 낮아 실제 비행체에는 적용 불가하였다. 하지만 향후 본 논문의 시험방법, 시뮬레이션 및 측정 결과는 저밀도 표면필름 구리망에 대한 비행체 적용 가능성 판단 시 활용할 수 있을 것이다.

### References

- 1) Ham, M. R., Choi, H. S. and Choi, W. J., "A review on the advent of composite aircraft and the

relevant technical problems," *Journal of Korea Association of Defense Industry Studies*, Vol. 16, No. 2, December 2009, pp. 259~283.

2) Fisher, F. A., Plumer, J. A. and Perala, R. A., *Aircraft Lightning Protection Handbook*, Federal Aviation Administration, 1989.

3) Kim, Y. T., Woo, H. C. and Kim, B. G., "A process of lightning analysis, protection design and verification for general military aircraft," *Proceeding of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences Spring Conference*, April 2019, pp. 303~304.

4) Hyun, S. Y., Song, Y. H., Jeoun, Y. M. and Kim, B. G., "Analysis method of electromagnetic

Transmission Characteristics for Carbon Fiber Reinforced Plastics Sandwich Structure," *Proceeding of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences Spring Conference*, July 2020, pp. 369~370.

5) Munk, B. A., *Frequency Selective Surface: Theory and Design*, Newyork: Wiley-Interscience, 2000.

6) MIL-STD-464C, "Electromagnetic Environment Effects Requirements for System," DoD, 2010.

7) Woo, H. C., Kim, Y. T., Jeoun, Y. M. and Kim, B. G., "A study on the external RF electromagnetic environment test of unmanned aerial vehicle," *Proceeding of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences Fall Conference*, November 2019, pp. 540~541.