

캐비티 공진 해석 기반 비행체 내부배선 복사내성 대책 설계 방안

Systematic Design Approach Based on Cavity-Mode Resonance Analysis for Radiated Susceptibility of Cables in Air Vehicles

강민성¹ · 김양원¹ · 노동규¹ · 김명회^{2*}

¹LIG 넥스원

²한경국립대학교 ICT로봇기계공학부 초연결기술융합연구소

Minseong Kang¹ · Yangwon Kim¹ · Donggyu Roh¹ · Myunghoi Kim^{2*}

¹PGM R&D Laboratory, LIG Nex1, Daejeon 34127, Korea

²*School of ICT, Robotics and Mechanical Engineering, Hankyong National University, Anseong 17579, Korea

[요 약]

본 논문에서는 비행체 내부배선 복사내성 특성 해석 및 개선 대책을 위한 효율적인 설계 방안을 제안한다. 비행체 성능향상을 위한 탑재장비의 종류 및 밀도가 크게 증가하면서 내부 배선의 역할도 매우 중요해지고 있다. 특히, 배선 경량화 및 유연성 증가 요구가 커짐에 따라서 내부 배선 쉴드 구조의 사용이 어려워지고 이에 따라서 쉴드 구조 이외의 방법으로 복사내성 특성을 개선할 필요가 있다. 본 논문에서는 내부 배선 복사내성 특성에 큰 영향을 미치는 캐비티 공진을 회피하고 억제하여 복사내성 특성을 개선할 수 있는 해석적 기법 기반 설계 방안을 제시한다. 시뮬레이션 예시 구조를 통해서 제안 방안의 효율성과 정확성을 검증하였다. 제안하는 방안은 기존 설계 방안 대비 99.6%의 설계 시간 단축을 달성했다. 이를 통해서 내부 배선 복사내성 대책을 위한 초기 설계나 최적화 설계에 매우 유용하게 활용될 수 있다.

[Abstract]

In this paper, we propose a systematic design approach based on cavity-mode resonance analysis to improve the radiated susceptibility of cables in air vehicles. As electronic devices equipped in air vehicles substantially increase, enhancing the radiated susceptibility of internal cables becomes more challenging and significant. The proposed design approach provides an efficient method to avoid and suppress cavity-mode resonances using analytical methods to estimate the resonance frequencies and the current ratio induced by the cavity-mode resonances. It is demonstrated in simulated results that the proposed method offers a design solution for improving the radiated susceptibility and reduces the computation time by up to 99.6% compared to the previous design method.

Key word : Cavity mode resonance, Electromagnetic compatibility, Radiated susceptibility, Wiring in metal enclosure.

<http://dx.doi.org/10.12673/jant.2023.27.5.587>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 22 August 2023; Revised 12 October 2023
Accepted (Publication) 24 October 2023 (30 October 2023)

*Corresponding Author : Myunghoi Kim

Tel: +82-31-670-5295

E-mail: mhkim80@hknu.ac.kr

1. 서론

최근 들어서 고기동, 고성능의 자율주행 비행체에 관한 관심이 높아지고 있다. 이런 비행체를 구현하기 위해서 내부에 탑재되는 전자장비의 종류와 수량 또한 증가하고 있으며, 탑재 장비 간 통신 및 탑재 장비 전원 공급을 위한 내부 배선의 밀도와 복잡도 역시 매우 증가하고 있다. 한편, 효율적인 탑재 장비 배치와 배선 라우팅을 위해서 배선 유연성의 증가가 요구되고 이에 따라서 배선의 유연성을 저하시키는 braided shield나 동축케이블과 같은 구조 사용이 어려워지고 있다. 이로 인해 비행체 내부 배선의 복사내성 특성 저하가 크게 우려되고 있다.

비행체 외부에 부착되는 안테나 또는 흡입구 등의 개구부를 형성하는 구조물에 의해서 외부에서 비의도적으로 조사된 전자파 등이 내부로 결합되는 현상이 발생할 수 있다. 이런 외부 입사 전자파 노이즈는 내부배선 설치공간의 캐비티 모드 공진 (Cavity mode resonance) 특성에 의해서 내부 배선에 노이즈 전류를 유기하게 되고 결과적으로 시스템 오동작과 같은 심각한 문제를 발생시킬 수 있다. 비행체 내부배선이 설치되는 공간은 주로 금속 격벽으로 둘러싸인 곳에 위치하는 경우가 많은데 이는 전기적으로 볼 때 금속 함체 안에 위치한 전송선으로 간주할 수 있다. 금속 함체 내 전송선의 경우 캐비티 공진으로 인해서 내성 특성이 매우 저하될 수 있다 [1]-[3]. 따라서 함체 공진에 의한 내성 특성 영향 분석이 필수적이다.

함체 공진 영향분석을 위한 기존 방법들은 대부분 3차원 전자장 시뮬레이션 방식에 의존한다 [4]-[8]. 3차원 전자장 시뮬레이션에는 모멘트 법 (Method of Moments), 유한요소 해석법 (FEM; Finite Element Method), 유한적분 기법 (Finite Integration Technique), 유한차분 시간영역법 (Finite Difference Time Domain) 등이 있다. 기존 방법은 복잡한 형상의 구조에 대해서도 해석이 가능하고 해석 정확도도 높다는 장점을 가지고 있다. 하지만 기존 전자장 시뮬레이션 방식은 해석 결과를 얻는데 걸리는 연산 시간이 매우 길다는 단점을 가지고 있다. 따라서 반복적인 해석 수행이 필요한 초기 설계 단계나 설계 최적화 수행에 적용하기에 어려움을 가진다. 특히, 비행체 내부 배선 내성 특성 분석을 위한 해석 구조가 대부분 직육면체 형태의 함체 구조임을 감안하면 직육면체 함체 구조 내부 배선에 대하여 3차원 전자장 시뮬레이션 기반 해석 방안을 대체할 신속한 내성 특성 해석 방안이 필요하다.

본 논문에서는 비행체 내부 배선의 복사내성 특성을 해석하고 개선할 수 있는 효율적인 대책설계 방안을 제안한다. 캐비티 공진 모드 주파수와 캐비티 모드 공진에 의한 유도 전류를 신속하게 예측할 수 있도록 해석적 기법에 기반한 설계 방안을 고안한다. 또한 제안 방법의 검증을 위해서 3차원 전자장 시뮬레이션 해석 결과와 제안 방법 결과를 비교 분석한다. 본 논문의 구성으로는 2장에서 캐비티 모드 공진 해석적 기법 기반 복사내성 대책 설계 방안에 대해서 기술하고 3장에서는 제

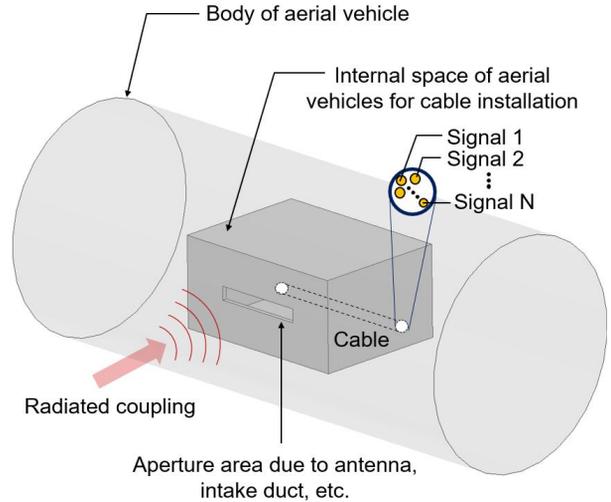


그림 1. 비행체 내부배선 복사내성 특성 개선 필요 구성 개략도

Fig. 1. A configuration of internal cables in air vehicles for radiated susceptibility improvement

안 방법의 검증을 위한 시뮬레이션 구성 및 결과에 대해서 기술한다. 끝으로 4장에서는 본 논문의 결론에 대해서 기술한다.

II. 캐비티 공진 해석 기반 복사내성 대책설계

비행체 내부배선 복사내성 특성 개선 설계를 위해서 본 연구에서는 그림 2와 같은 대책 설계 방안을 제안한다. 본 설계 방안은 내부배선 복사내성 특성에 큰 영향을 주는 캐비티 모드 공진에 대해서 분석하고 이를 회피 또는 최소화하는 방향에 기반을 둔다. 그림 2에서 보는 것처럼 본 설계 방안은 캐비티 모드 공진 주파수 기반 해석, 캐비티 모드 공진 유도 전류 기반 해석, 3차원 전자장 시뮬레이션 기반 검증의 3단계로 이루어진다. 각 단계를 통해서 캐비티 모드 공진에 의한 복사내성 특성 저하를 최소화하는 내부배선 설치 공간 형상 및 내부 배선 설치 위치에 대한 대책 설계가 가능하다.

제안하는 설계 방안의 첫 번째 단계인 캐비티 모드 공진 주파수 해석 기반 설계 단계에서는 내부배선 설치공간 형상 변수에 의해서 결정되는 캐비티 모드 공진 주파수를 분석한다. 본 연구에서는 비행체 내부 배선 복사 내성 특성 분석 및 개선 설계를 적용하는 범위를 그림 3과 같은 직육면체 형태의 캐비티 구조에 초점을 맞춘다. 직육면체 형상은 실제 비행체 내부에서 많이 활용되는 형태이다. 직육면체 형상의 내부구조 설계 변수는 L_x, L_y, L_z 이다. 직육면체 형상의 캐비티 구조에서 발생하는 캐비티 모드 공진 주파수는 식 (1)을 통해서 다음과 같이 구할 수 있다 [9].

$$f_{pqr} = \frac{v_p}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{p\pi}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{q\pi}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{r\pi}{L_z}\right)^2} \quad (1)$$

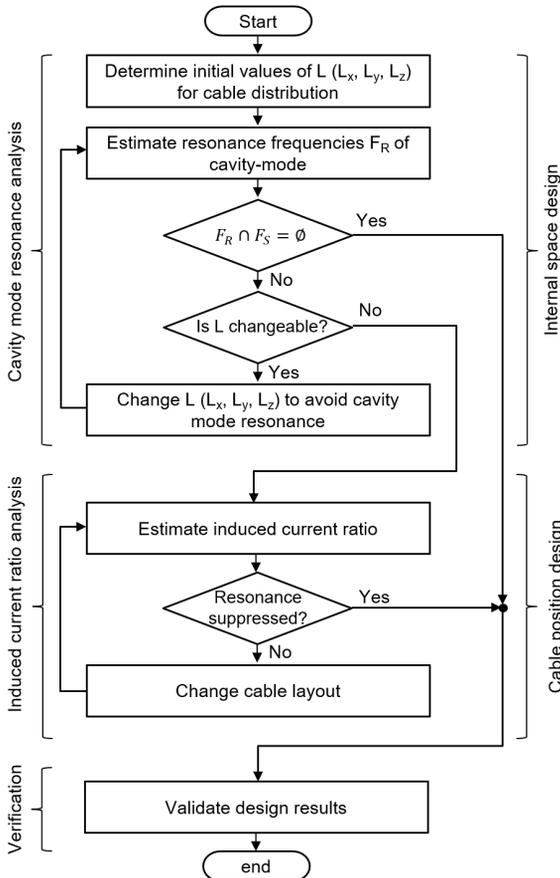


그림 2. 제안하는 캐비티 모드 공진 해석 기반 내부배선 복사내성 대책 설계방안

Fig. 2. Procedure of proposed systematic design approach for radiated susceptibility of internal cables

여기서, v_p 는 위상속도를 나타내고 p, q, r 은 각각 x, y, z 축 방향으로의 모드 수를 나타낸다. 모드 수 p, q, r 에 따라서 캐비티 모드 공진 주파수가 산출되며 관심 주파수 대역 내 포함되는 공진 주파수들의 집합을 $F_R = \{f_{pqr} | p, q, r = 0 \dots N\}$ 로 정의한다. 그리고 배선신호의 주요 주파수들의 집합을 F_S 로 정의한다. F_S 에는 통신 반송파, 클럭 신호의 원천주파수 및 고조파 등이 포함될 수 있다. 이런 신호들의 복사 내성 특성을 개선하려면 이상적으로 신호 주파수와 캐비티 모드 공진 주파수가 일치하지 않으면 된다. 즉, $F_R \cap F_S = \emptyset$ 이면 된다. 만약 신호 주파수와 캐비티 모드 공진 주파수가 일치한다면 L_x, L_y, L_z 를 변경(내부 배선 설치 공간 설계 수정) 해서 내부 배선 복사 내성 특성을 개선할 수 있다.

$F_R \cap F_S \neq \emptyset$ 이고 내부 배선 설치 공간 설계 변경이 불가능한 경우에는 2단계에서 제안하는 캐비티 모드 공진 유도 전류 해석 기반 설계를 수행한다. 2단계에서는 내부배선 공간 설계 변경이 불가능한 상황에서 내부 배선 설치 위치 설계를 변경함

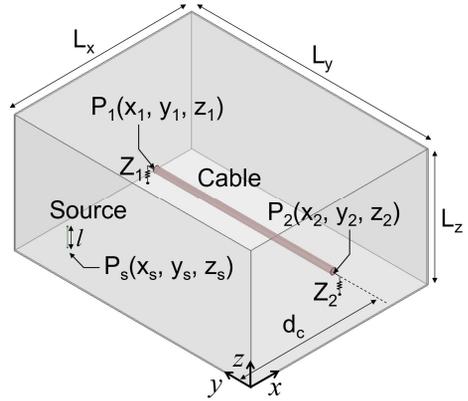


그림 3. 복사내성 대책설계 적용 내부 배선 구조
Fig. 3. A configuration of internal cables in resonant cavity

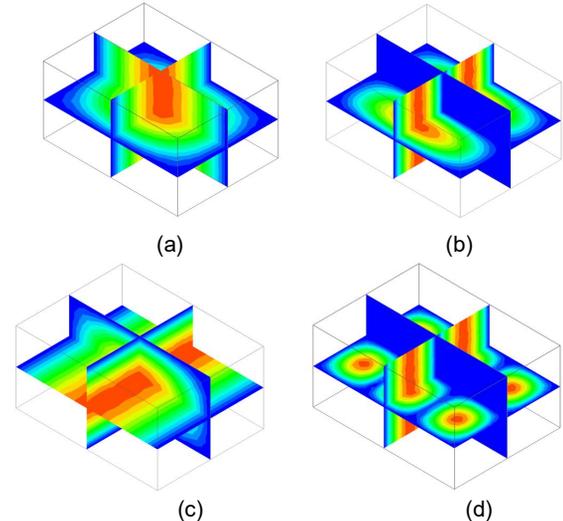


그림 4. 캐비티 모드 공진 전기장 분포. (a) TE110, (b) TE210, (c) TE011, (d) TE230

Fig. 4. Electric field distributions of cavity mode resonances. (a) TE110, (b) TE210, (c) TE011, (d) TE230

으

로써 복사내성 특성을 개선하게 된다. 그림 4는 캐비티 모드 공진 TE110, TE120, TE011, TE230의 전기장 분포를 보여준다. 그림에서 보는 것처럼 각 모드 별로 전기장의 세기가 최대, 최소가 되는 위치가 서로 다르다. 따라서 캐비티 모드 공진 주파수가 일치하더라도 내부배선의 위치를 조절해서 결합되는 노이즈 양을 축소 또는 최소화 할 수 있다.

앞서 언급한 것처럼 본 연구에서는 직육면체 형태의 캐비티 구조에 초점을 맞춘 대책 설계 방안을 제안하고 있다. 2단계에서는 개구부를 통해서 내부배선에 결합하는 전자파 노이즈 영향을 분석하기 위해서 그림 3과 같은 경우를 가정한다. 직육면체 형태 캐비티 내부에는 개구부를 통해서 결합 되는 전자파 영향을 모사하기 위한 미소 모노폴 또는 미소 다이폴 소스가 위치한다. 여기서 개구부를 통해 결합 되는 전자파량

에 대한 등가 소스 모델에 대한 유도 단계는 고려하지 않는다. 그 이유는 본 연구에서는 개구부를 통해서 결합되는 복사 전자파 노이즈의 양을 산출하기보다는 캐비티 모드 공진에 의한 영향을 분석하고 최소화하는데 초점을 맞추고 있기 때문에 비행체 개구부를 통해서 결합되는 복사 전자파를 캐비티 내 미소 모노폴 또는 미소 다이폴 소스로 대체했다.

캐비티 내 위치하는 내부 배선은 단일 도체로 구성되고 이 도체를 통해 전달되는 신호의 접지면은 캐비티 구조의 근접면을 사용하게 된다. 이 케이블의 특성 임피던스는 Z_c 이며 케이블 종단임피던스는 Z_1, Z_2 이다. 미소 다이폴 소스로부터 내부 배선에 결합되는 노이즈 전류 비율을 신속하게 산출하기 위해서 다음과 같은 해석적 방법을 사용한다 [10]. 이 해석적 방법은 완전도체로 이루어진 직육면체 형태의 캐비티 내에 존재하는 z축 방향 미소 다이폴과 단일 전송선 사이의 전류 관계를 나타낸다. 단일 전송선은 미소 다이폴 아래쪽 x-y 평면상에 위치하며 캐비티 벽면과 평행하게 놓여있는 경우를 가정한다. 캐비티 내 유전체는 균일한 유전율을 갖는 것으로 가정하는데 이는 비행체 내부배선 설치 공간에 대해서 유효한 가정이며 일반적으로 내부배선 설치공간은 공기로 채워져 있다. 아래 식의 k_l 는 캐비티 모드 공진에 의한 영향을 예측할 수 있도록 미소다이폴 소스로부터 내부배선에 결합되는 전류량의 비율을 나타낸다.

$$k_l = \Gamma_1 S_1 + \Gamma_2 S_2 \tag{2}$$

$$\Gamma_1 = -\frac{\{(Z_2 + Z_c)(Z_1 + Z_c) - (Z_1 + Z_c)(Z_2 - Z_c)\}}{\{(Z_2 + Z_c)(Z_1 + Z_c) - (Z_2 - Z_c)(Z_1 - Z_c)e^{-2jkL_c}\}} \times \frac{e^{-jkL_c}}{(Z_1 + Z_c)} \tag{3}$$

$$\Gamma_2 = \frac{(Z_1 + Z_c) - (Z_1 - Z_c)e^{-2jkL_c}}{(Z_2 + Z_c)(Z_1 + Z_c) - (Z_2 - Z_c)(Z_1 - Z_c)e^{-2jkL_c}} \tag{4}$$

$$S_1 = \frac{4jl}{\epsilon\omega L_x L_y} \sum_{m=1n=1}^{\infty} \sum_{m=1n=1}^{\infty} k_{mn}^{-2} \left\{ \left(\frac{m\pi}{L_x} \right)^2 + \left(\frac{n\pi}{L_y} \right)^2 \right\} \times \frac{\sin(k_{mn}z_1)\cos\{k_{mn}(L_z - z_s)\}}{\sin(k_{mn}L_z)} \sin\left(\frac{m\pi x_1}{L_x}\right) \sin\left(\frac{m\pi x_s}{L_x}\right) \times \sin\left(\frac{n\pi y_1}{L_y}\right) \sin\left(\frac{n\pi y_s}{L_y}\right) - \frac{4jl}{\epsilon\omega L_x L_y \sin(\omega\sqrt{\epsilon\mu}L_c)} \sum_{m=1n=1}^{\infty} \sum_{m=1n=1}^{\infty} \frac{m\pi}{(\omega L_x \sqrt{\epsilon\mu})^2 - (m\pi)^2} \times \frac{\sin(k_{mn}z_1)\cos\{k_{mn}(L_z - z_s)\}}{\sin(k_{mn}L_z)} \times \sin\left(\frac{n\pi y_s}{L_y}\right) \sin\left(\frac{n\pi y_1}{L_y}\right) \sin\left(\frac{m\pi x_s}{L_x}\right)$$

$$\times \left[\omega L_x \sqrt{\epsilon\mu} \left\{ \cos\left(\frac{m\pi(x_1 + L_c)}{L_x}\right) - \cos\left(\frac{m\pi x_1}{L_x}\right) \cos(\omega L_c \sqrt{\epsilon\mu}) \right\} + m\pi \sin\left(\frac{m\pi x_1}{L_x}\right) \sin(\omega L_c \sqrt{\epsilon\mu}) \right] \tag{5}$$

$$S_2 = \frac{4jl}{\epsilon\omega L_x L_y} \sum_{m=1n=1}^{\infty} \sum_{m=1n=1}^{\infty} k_{mn}^{-2} \left\{ \left(\frac{m\pi}{L_x} \right)^2 + \left(\frac{n\pi}{L_y} \right)^2 \right\} \times \frac{\sin(k_{mn}z_1)\cos\{k_{mn}(L_z - z_s)\}}{\sin(k_{mn}L_z)} \sin\left(\frac{m\pi(x_1 + L_c)}{L_x}\right) \times \sin\left(\frac{m\pi x_s}{L_x}\right) \sin\left(\frac{n\pi y_1}{L_y}\right) \sin\left(\frac{n\pi y_s}{L_y}\right) - \frac{4jl}{\epsilon\omega L_x L_y \sin(\omega\sqrt{\epsilon\mu}L_c)} \sum_{m=1n=1}^{\infty} \sum_{m=1n=1}^{\infty} \frac{m\pi}{(\omega L_x \sqrt{\epsilon\mu})^2 - (m\pi)^2} \times \frac{\sin(k_{mn}z_1)\cos\{k_{mn}(L_z - z_s)\}}{\sin(k_{mn}L_z)} \times \sin\left(\frac{n\pi y_s}{L_y}\right) \sin\left(\frac{n\pi y_1}{L_y}\right) \sin\left(\frac{m\pi x_s}{L_x}\right) \times \left[\omega L_x \sqrt{\epsilon\mu} \left\{ \cos\left(\frac{m\pi(x_1 + L_c)}{L_x}\right) \cos(\omega L_c \sqrt{\epsilon\mu}) - \cos\left(\frac{m\pi x_1}{L_x}\right) \right\} + m\pi \sin\left(\frac{m\pi(x_1 + L_c)}{L_x}\right) \sin(\omega L_c \sqrt{\epsilon\mu}) \right] \tag{6}$$

$$k_{mn} = \sqrt{k_0^2 - \left(\frac{m\pi}{L_x}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{L_y}\right)^2} \tag{7}$$

여기서 k_0 는 파수, L_c 는 배선 길이, Z_1, Z_2 는 배선 양 끝에 위치한 종단 임피던스, Z_c 는 배선 특성임피던스, l 은 미소 다이폴 길이, x_s, y_s, z_s 는 미소 다이폴의 x, y, z 위치를 나타낸다. 위에서 주어진 해석적 방법을 통해서 내부 배선의 위치를 변경해 가며 캐비티 모드 공진에 의한 영향을 예측할 수 있다. 특히, 제안 대책설계의 1단계에서 신호 주파수와 일치하거나 근접해 있는 캐비티 모드 공진 주파수를 회피하기 어려운 경우에는 2단계에서 해당 캐비티 모드의 전기장 분포 분석을 통해서 결합량이 최소가 되는 위치를 탐색할 수 있다. 결합량이 최소가 되는 위치 탐색은 위에서 제시하는 해석적 방법과 반복 탐색 내지는 최적화 탐색 알고리즘 등을 결합해서 체계적으로 원하는 결과를 얻을 수 있다.

제안하는 대책설계의 마지막 단계에서는 1단계 또는 2 단계에서 구한 결과를 3차원 전자장 시뮬레이션을 이용하여 검증한다. 본 연구에서는 FEM을 기반으로 하는 Ansys HFSS 프로그램을 활용하였다. 기존의 복사내성 대책설계에서는 3차

표 1. 시뮬레이션 대상 구조 설계 변수 및 치수

Table. 1. Design parameters and dimensions of simulation structure for demonstrating a proposed design approach

Parameter	Dimensions (mm)	Parameter	Dimensions (mm)
L_x	400	x_2	200, 300, 380
L_y	300	y_2	250
L_z	200	z_2	10
x_1	200, 300, 380	Z_C	50Ω
y_1	50	x_s	100
z_1	10	y_s	100
Z_1	50Ω	z_s	50
Z_2	50Ω	l	20
d_c	200, 300, 380	f_s	900 MHz

원 전자장 시뮬레이션에만 전적으로 의존하여 최적 결과를 도출하는 데까지 걸리는 시간이 매우 길다. 그래서 설계 초기 단계에서 활용이 어렵고 제한된 설계 기간 내에 최적화된 결과를 얻기도 어렵다. 하지만 본 연구에서 제안하는 방안은 마지막 결과의 검증에 대해서만 3차원 전자장 시뮬레이션을 활용하기 때문에 비행체 내부 배선의 복사내성 특성을 개선하는데 매우 유용한 방안이다.

III. 시뮬레이션 구성 및 결과

3-1 시뮬레이션 구성

본 연구에서 제안하는 대책설계 방안에 대한 예시를 보이기 위해서 표 1과 같은 시뮬레이션 구성을 가정하였다. 배선이 위치하는 비행체 내부 공간은 400 mm × 300 mm × 200 mm의 직육면체 형태로 고정했다. 제안하는 방안 1단계에서 신호 주파수와 캐비티 모드 공진 주파수가 일치 또는 근처에 위치한 경우에는 내부 공간 수치를 변경할 수 있다고 언급하였다. 이 방식을 예시에도 적용할 수 있으나 2단계 방안에 초점을 맞추기 위해서 본 시뮬레이션 구성 예시에서는 이 부분은 생략한다. 내부 배선은 x-y 평면상에서 y축과 나란하게 놓이고 캐비티 모드 회피를 위해서 3가지 위치를 고려했다. 3가지 위치에 대한 배선 시작 위치는 $P_1(x_1, y_1, z_1) = (200, 50, 10), (300, 50, 10), (380, 50, 10)$ 이다. 배선 길이는 200 mm 이다. 3가지 배선 위치는 원점으로부터 x축 방향으로 떨어진 거리인 $d_c = 200, 300, 380$ mm로 나타낼 수도 있다. 일반적으로 내부배선을 설계할 때 주어진 공간에서 배선의 위치를 벽면 쪽, 중앙 쪽 등을 선택하기 때문에 이런 구성을 선택했다. 내부배선의 양 끝은 50 Ω으로 종단되어 있고 특성 임피던스는 50 Ω이다. 미소 다이폴의 위치는 (100, 100, 50)이고 길이는 20 mm 이다. 이 예시에서는 배선을 통해서 전달되는 신호의 주파수를 900 MHz로

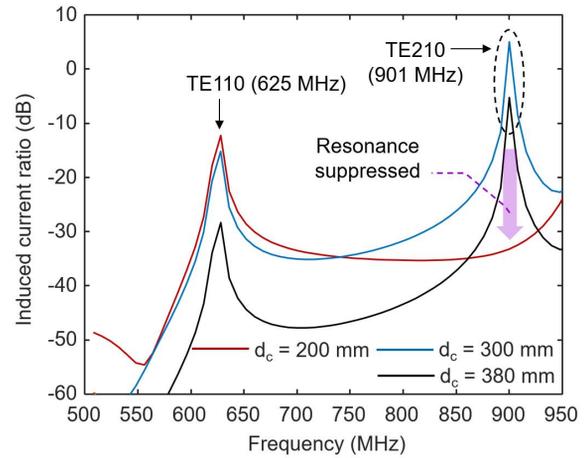


그림 5. 해석적 기법 기반으로 산출된 유도 전류 비율
Fig. 5. Induced current ratio obtained from analytical method

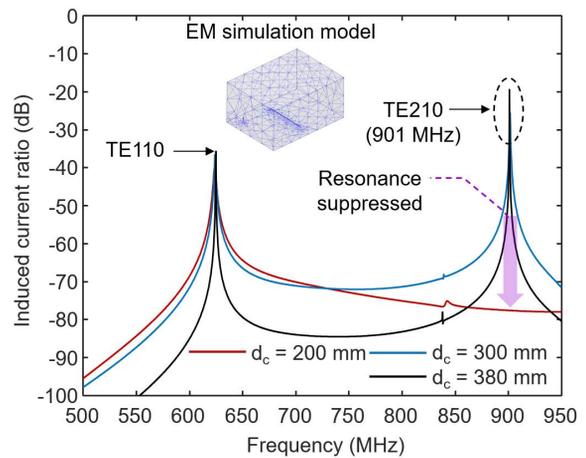


그림 6. 설계 검증을 위한 3차원 전자장 시뮬레이션 기반으로 산출된 유도 전류 비율
Fig. 6. Induced current ratio obtained from FEM-based electromagnetic simulation

가정한다.

3-2 시뮬레이션 결과 분석

식 (1)을 통해서 주어진 내부배선 설치공간에서의 캐비티 모드 공진 주파수를 구하면 901.4 MHz ($p=2, q=1, r=0$)로 신호 주파수에 위협이 되는 것을 알 수 있다. 이를 회피하기 위해서 내부배선 설치 공간의 치수를 변경할 수도 있지만 앞서 언급한 것처럼 여기서는 배선 위치 변경 (2단계)을 통해서 복사내성 특성 위협을 개선할 수 있음을 보인다.

그림 5는 시뮬레이션 구성에 대해서 식 (2)를 적용하여 구한 유도 전류 비율을 나타낸다. 관심 주파수는 900 MHz 대역 근처 이나 캐비티 모드 공진에 의한 영향에 대한 이해를 높이기 위해서 500 MHz에서 950 MHz 대역을 살펴보았다. 그림에서 적, 청, 흑색 그래프는 각각 $d_c = 200, 300, 380$ mm일 경우이다. $d_c =$

380 mm일 때 (배선을 벽면 근처에 배치했을 때) 그림에서 보는 것처럼 캐비티 모드 공진에 의해서 625 MHz, 901 MHz에서 결합되는 유도 전류 비가 매우 높은 것을 알 수 있다. 이것은 복사내성 특성 저하를 의미한다. 여기서 625 MHz는 캐비티 기본 공진모드인 TE₁₁₀ ($p=1, q=1, r=0$)에 의해서 결합 비율이 높아졌으며 901 MHz는 TE₂₁₀에 의해서 결합 비율이 높게 된다. 복사내성 특성을 개선하기 위하여 배선 위치를 $d_c = 200, 300$ mm로 변경할 수 있다. 이때, $d_c = 300$ mm 일 때는 TE₂₁₀ 모드에서의 전류 결합 비율이 증가하고 $d_c = 200$ mm (배선을 중앙에 위치했을 때)에서는 캐비티 모드 공진이 억제되는 것을 볼 수 있다. 이것은 그림 4 (b)에서 보듯이 TE₂₁₀ 모드에서의 전기장 분포가 내부 공간 중앙에서는 최소화 되기 때문이다. 그림 5와 같이 2단계에서 얻어진 결과를 기반으로 내부 배선을 중앙에 위치시켜서 복사내성 특성을 크게 개선시킬 수 있다. 여기서 한가지 눈여겨 볼 것은 만약 신호주파수에 해당하는 캐비티 모드 공진 이 TE₁₁₀ 모드였다면 내부 배선을 중앙이 아닌 벽면에 가장 근접하게 위치시키는 것이 전류 결합 비율을 감소시켜서 복사내성 특성을 개선할 수 있다는 점이다.

이와 같은 결과를 FEM 기반 3차원 전자장 시뮬레이션을 이용하여 그림 6과 같이 검증할 수 있다. 그림 6은 2단계에서 수행한 내용에 대해서 동일하게 3차원 전자장 시뮬레이션을 수행한 결과이다. 2단계 결과에서 알 수 있었던 것처럼 주어진 구성에 대해서 TE₂₁₀ 모드에 의한 복사내성 특성 저하가 발생할 수 있으며 이는 배선 위치를 조절하여 TE₂₁₀ 모드를 억제함으로써 복사내성 특성 개선이 이루어짐을 3차원 전자장 시뮬레이션을 이용해서도 동일하게 검증하였다.

위 시뮬레이션 결과분석에서 보는 것처럼 다양한 캐비티 모드 공진에 대해서도 제안 방안을 적용하면 복사내성 특성을 개선할 수 있다. 그리고 이런 결과를 얻는데 걸리는 해석 시간을 고려해보면 식 (1)과 식 (2)와 같은 해석적 방법을 통해서 결과를 얻는데 걸린 시간은 1.3초, 7.2초이다. 위 식은 MATLAB을 통해서 구현했다. 3차원 전자장 시뮬레이션 기반 해석 시간은 2031 초이다. 내부배선 설계를 1회 수행할 때 해석적 기법을 이용하면 3차원 전자장 시뮬레이션만을 이용했을 때보다 282 배 빠르게 설계가 가능하다. 따라서, 제안하는 대책설계 방안을 이용하면 다수의 반복적인 설계 수행이 필요한 초기 설계 단계나 최적화 설계 단계에서 효율적으로 결과를 얻을 수 있고 이를 통해서 복사내성 특성이 강화된 설계 가이드나 최적화 결과를 도출할 수 있다.

IV. 결론

본 연구에서는 캐비티 모드 공진 해석 기반 비행체 내부 배선 복사내성 대책설계 방안을 제안하였다. 캐비티 모드 공진 주파수를 예측하고 합체 내부에 위치하는 배선에 결합되는 노이즈 전류비를 해석기법을 통하여 효율적으로 예측함으로써

캐비티 모드 공진을 회피하거나 억제할 수 있는 방안에 대해서 제시하였다. 제안하는 대책설계 방안을 검증하기 위하여 예시 구조에 대해서 분석을 수행했으며 제안하는 방법을 적용할 경우 전자장 해석에만 의존하는 기존 설계 방식 대비 99.6% 설계 시간 단축을 이룰 수 있음을 보였다. 본 연구에서는 직육면체 형태의 내부 공간에 대한 대책설계 방안을 제시했으나 추후 비행체 내부 배선 공간에 활용되는 또 다른 형태인 원통형 구조에 대해서도 연구 확장이 필요하다.

References

- [1] D. M. Hockanson, J. L. Drewniak, T. H. Hubing and T. P. Van Doren, "FDTD modeling of common-mode radiation from cables," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 38, No. 3, pp. 376-387, Aug. 1996.
- [2] L. Paletta, J.-P. Parmantier, F. Issac, P. Dumas and J. . -C. Alliot, "Susceptibility analysis of wiring in a complex system combining a 3-D solver and a transmission-line network simulation," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 44, No. 2, pp. 309-317, May. 2002.
- [3] Z. A. Khan and J. L. Volakis, "Experimental and analytical study of EMC/EMI effects on PCBs and cables enclosed within metallic structures," *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, Albuquerque, New Mexico: NM, USA, pp. 49-52, 2006.
- [4] Kuang-Pin Ma, Min Li, J. L. Drewniak, T. H. Hubing and T. P. van Doren, "Comparison of FDTD algorithms for subcellular modeling of slots in shielding enclosures," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 39, No. 2, pp. 147-155, May. 1997.
- [5] W. P. Carpes, L. Pichon and A. Razek, "Analysis of the coupling of an incident wave with a wire inside a cavity using an FEM in frequency and time domains," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 44, No. 3, pp. 470-475, Aug. 2002.
- [6] Chao Feng and Zhongxiang Shen, "A hybrid FD-MoM technique for predicting shielding effectiveness of metallic enclosures with apertures," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 47, No. 3, pp. 456-462, Aug. 2005.
- [7] E. Liu, P. -A. Du, W. Liu and D. Ren, "Accuracy Analysis of Shielding Effectiveness of Enclosures With Apertures: A Parametric Study," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 56, No. 6, pp. 1396-1403, Dec. 2014.
- [8] K. Chen, P. -A. Du, B. -L. Nie and D. Ren, "An Improved MOM Approach to Determine the Shielding Properties of a Rectangular Enclosure With a Doubly Periodic Array of

Apertures,” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 58, No. 5, pp. 1456-1464, Oct. 2016.

[9] David M. Pozar, *Microwave Engineering*, 4th ed. New York, NY: Wiley, 2005.

[10] G. Spadacini, S. A. Pignari and F. Marliani, “Closed-form transmission line model for radiated susceptibility in metallic enclosures,” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 47, No. 4, pp. 701-708, Nov. 2005.



강민성 (Minseong Kang)

2021년 2월 : 광운대학교 전자공학부(공학사)
2022년 4월~현재 :LIG넥스원 PGM체계종합연구소 연구원
※관심분야 : 무인비행체, EMI/EMC, RF통신 등



김양원 (Yangwon Kim)

2014년 2월 : 아주대학교 전자공학부(공학사)
2014년 1월 ~ 현재 :LIG넥스원 PGM체계종합연구소 선임연구원
※관심분야 : 무인비행체, EMI/EMC 등



노동규 (Donggyu Roh)

2001년 2월 : 부산대학교 전자공학과(공학석사)
2007년 7월 ~ 현재 :LIG넥스원 PGM체계종합연구소 수석연구원
※관심분야 : 무인비행체, EMI/EMC 등



김명희 (Myunghoi Kim)

2003년 2월: KAIST 전기 및 전자공학과 (학사)
2005년 2월: KAIST 전기 및 전자공학과 (석사)
2012년 8월: KAIST 전기 및 전자공학과 (박사)
2005년 2월 ~ 2008년 7월 : 국방과학연구소
2012년 9월 ~ 2015년 8월 : 한국전자통신연구원
2015년 9월 ~ 현재 : 한경국립대학교 ICT로봇기계공학부 부교수
※관심분야 : Signal Integrity, EMI/EMC, 반도체 패키지 설계, Microwave 회로