THE JOURNAL OF KOREAN INSTITUTE OF ELECTROMAGNETIC ENGINEERING AND SCIENCE. 2026 February; 37(2), 173～182.

http://dx.doi.org/10.5515/KJKIEES.2026.37.2.173
ISSN 1226-3133 (Print) · ISSN 2288-226X (Online)

입사각을 반영한 Friis-PWB 하이브리드 모델 기반 축소 항공기 함체 전기장 예측 및 검증

Prediction and Validation of Electric Fields in a Scale-Model Aircraft Fuselage Based on a Friis-PWB Hybrid Model Incorporating Incidence Angle Effects

황대영 · 최준영 · 한정훈 · 이재욱

Dae-Young Hwang · Jun-Yeong Choi · Jung-Hoon Han · Jae Wook Lee

요 약

본 논문은 대형 금속 함체의 내부 전기장을 예측하기 위해 Friis 방정식과 PWB(power balance) 이론을 결합한 하이브리드 방법을 제안하고, 항공기를 1:25 축소한 알루미늄 함체로 실험을 통해 검증한다. 또한 실제 항공기 크기에서도 유효하게 적용 가능한지에 대해 확인하기 위해 시뮬레이션을 통해 검증한다. 창문은 전기적으로 작은/큰 경우의 평균 결합단면적과 임계 주파수의 연속조건을 정리하고, 입사각 의존성을 반영하였다. 품질계수와 손실항에 기반한 전력 평형식으로 내부 전력·전계를 계산하고, Friis 식으로 계산한 입사 전력밀도를 창문별로 합산한다. 실험은 혼 안테나로 1～10 GHz를 500 MHz 간격으로 스윕하고, 프로브로 내부 9개 지점을 측정해 평균했으며, 케이블 손실은 VNA로 보정했다. 함체에 입사되는 각도에 따른 실측값은 대부분 ±5 dB 범위 내에서 예측치와 일치했다. 실제 항공기 크기에 대한 시뮬레이션 결과 또한 예측치와 일치한다. 제안 방법은 각도 효과를 포함하면서도 계산이 간단해 대형 구조의 신속한 전자파 안전성 평가에 유용하며, 향후 수평 편파와 3차원 입사 모델을 포함해 정확도를 높일 예정이다.

Abstract

This study proposed a hybrid approach that combined the Friis equation and power balance (PWB) theory to predict the internal electric field of a large metallic enclosure and experimentally validated the method using a 1:25-scale aluminum enclosure representing an aircraft. Its applicability at the full aircraft scale was further verified through simulations. For the window apertures, we summarized the continuity conditions for the average coupling cross section and critical frequency in the electrically small/large regimes and incorporated the dependence on the angle of incidence. The internal power and electric field were obtained from a power balance equation based on the quality factor and loss terms, and the incident power density from the Friis equation was summed over individual windows. In the experiments, a horn antenna was swept from 1 to 10 GHz in 500 MHz steps, fields at nine interior points were probed and averaged, and cable losses were corrected using a VNA. The measured values as a function of incidence angle typically agreed with the predictions within ±5 dB. Full-scale aircraft simulations agreed with the predicted values. Because the proposed method accounts for angular effects but remains simple to compute, it is useful for rapid electromagnetic safety assessments of large structures. Future work will incorporate horizontal polarization and a fully three-dimensional incidence model to further improve accuracy.

Key words: Aircraft, Aperture, Friis Equation, Incidence-Angle, PWB Method

---

「이 논문은 2022년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(KRIT-CT-23-005).」

한국항공대학교 항공전자정보공학과(Department of Electronics and Information Engineering, Korea Aerospace University)

· Manuscript received October 31, 2025 ; Revised November 20, 2025 ; Accepted November 21, 2025. (ID No. 20251031-133)

· Corresponding Author: Jae Wook Lee (e-mail: jwlee1@kau.ac.kr)

ⓒ Copyright The Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Ⅰ. 서 론

기술의 발전으로 정보화가 심화되면서 모든 정보와 시스템이 디지털화되었고 통신, 금융, 개인정보, 운송수단의 자동화도 전산화되었다. 이러한 환경에서 고출력 전자파(HPEM, high power electromagnetic)나 의도적 전자기 간섭(IEMI, intentional electromagnetic interference)에 노출될 경우 시스템의 오작동 및 고장으로 인해 사회의 혼란과 막대한 물적, 인적 피해가 발생할 수 있으며, 이는 국가 안보, 산업 기반시설 그리고 개인 안전에 큰 위협이 될 수 있다. 따라서 핵심 전자장비를 보호하기 위한 전자파 방호 기술의 중요성이 더욱 부각되고 있다[1]-[4].

HPEM과 IEMI는 특정 주파수에 국한되지 않고 광대역에 걸쳐 존재한다. 따라서 방호 기술은 임의의 주파수에 대한 방호대상의 응답을 평가할 수 있어야 한다. 주파수별 취약점 분석을 통해 핵심 전자장비의 외부 간섭에 대한 내성을 강화할 수 있으므로, 광대역 해석의 중요성이 더욱 커지고 있다. 또한 올바른 해석을 위해서 특정 전자장비뿐 아니라 이를 둘러싼 주변 환경까지 고려되어야 한다. 그러나 주변 환경을 포함하는 실제 구조물은 기하적·재료적으로 매우 복잡하고 거대하여 해석의 난이도를 크게 올린다[5].

전자파 방호 해석 방법은 크게 실험적, 해석적, 수치적, 통계적 방법으로 구분한다. 이 중 실험적 방법은 가장 높은 신뢰도의 결과를 제공하는 반면, 현실의 장비에 영향을 끼칠 정도의 고출력 전자파를 실제로 재현하는 데에는 심각한 제약이 있다. 해석적 방법은 구조물이 기하적·재료적으로 매우 단순하고 이상적인 경우에만 적용 가능하므로, 현대의 복잡한 시스템 분석에는 적합하지 않다. 수치적 해석은 전자파 방호 기술에 있어 전통적인 기법이었지만, 전기적으로 대형 구조물의 경우 필요한 메쉬 및 그리드 수가 기하급수적으로 증가하여 시간과 컴퓨팅 자원이 과도하게 요구된다. 또한 선박이나 건물과 같은 초대형 구조물은 정확한 full-wave 수치해석을 위한 모델을 구축하는 것이 거의 불가능하고 요구되는 시간과 자원도 비현실적이다. 이러한 한계로 인해, 광대역 해석과 대형 구조물 해석이 가능한 통계적 접근법이 점차 주목을 받고 있다.

통계적 해석 기법 중 하나인 PWB(power balance) 방법은 EMC 시험에 사용되는 잔향실 내 전계 강도를 예측하는 데 활용된다[6]. 전기적으로 큰 함체 내부에서는 다수의 모드가 형성되고, 이들의 통계적 특성으로부터 유도되는 유효 시험 공간(working volume) 내 전기장 분포는 EMC 시험뿐 아니라 함체 자체의 전자기적 특성 분석에도 유용하다. 그러나 현실의 함체는 완전히 밀폐되어 있지 않으며, 외부는 통계적이지 않고 결정론적 전자기 환경에 놓여 있으므로 기존의 PWB 방법만으로 대형 구조물을 해석하는 데에는 한계가 있다.

따라서 본 논문에서는 개구가 존재하는 함체를 대상으로, 외부 공간의 전파 특성을 해석하는 Friis 방정식과 내부 공간의 통계적 특성을 설명하는 PWB 방법을 결합하여 해석을 수행한다. 외부 전원이 주어졌을 때, 함체로 입사하는 전자파의 입사각과 편파각이 개구 결합 단면적을 결정하고, 이를 PWB에 적용함으로써 내부의 통계적 전계 강도를 예측할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 절차를 기반으로, 다양한 입사각을 갖는 전자파에 대한 함체 내부 전기장을 효과적으로 예측할 수 있는 새로운 통계적 분석 방법을 제안한다.

본 논문 Ⅱ장에서는 PWB 방법을 소개하고 개구의 전기적 크기에 따른 평균결합단면적 산출 방법과 Friis-PWB 결합 기법을 제시한다. Ⅲ장에서는 1:25의 비율로 축소된 항공기 함체의 제원과 측정 환경을 기술한다. Ⅳ장에서는 제안된 해석과 실험 결과를 비교 분석한다. Ⅴ장에서 실제 항공기 크기에서도 유효하게 적용 가능한지에 대해 시뮬레이션을 통해 검증하며, Ⅵ장에서 결론으로 끝을 맺는다.

Ⅱ. 확률 기반 해석방법

2-1 PWB Method

PWB 방법은 확률론적 접근으로서, 정상 상태에서 함체에 유입되는 평균 전력(P_t)과 함체 내부에서 소모되는 평균 전력(P_d)이 동일하다는 전력 균형 가정을 둔다. 이는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 본 연구에서 PWB 이론을 적용하기 위한 조건은 다음과 같다. 첫째, 분석 대상은

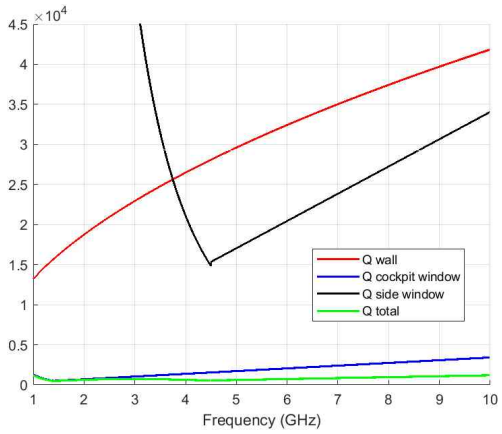

그림 1. 함체 파라미터별 품질계수
Fig. 1. Quality factor according to enclosure parameters.

전기적으로 충분히 큰 구조물이다. 둘째, 주파수의 파장이 구조물의 크기보다 충분히 작다면, 내부 전자기장이 임의 지점에서 통계적으로 균일하게 분포한다고 본다[7],[8].

$$P_t = P_d = P_{wall} + P_{ant} + P_{ap} + P_{obj} = \sum_j P_{jd} \tag{1}$$

P_{wall}은 벽면으로 인한 손실전력, P_{ant}는 안테나로 인한 손실전력, P_{ap}는 개구면으로 인한 손실전력, P_{obj}는 물체에 의한 손실전력을 의미한다. 식 (1)에서 네 가지의 내부 손실전력의 합으로서 내부의 총 손실전력을 구하게 된다. 본 연구에서 사용된 E-field 프로브는 매우 작은 구조로 P_{ant}은 무시할 수 있는 수준이며 실험 및 시뮬레이션 모두 함체 내부에 유의미한 물체(P_{obj})가 존재하지 않으므로 P_{wall}과 P_{ap}만을 고려하였다.

PWB의 주요 파라미터는 품질계수(Q-factor)와 평균결합단면적 $\langle \sigma_t \rangle$가 있다. 품질계수의 경우 식 (2)~식 (4)로 정의되며, 이를 계산한 결과를 그림 1과 같이 나타냈다[7],[8].

$$Q^{-1} = Q_{wall}^{-1} + Q_{ap}^{-1} \tag{2}$$

$$Q_{wall} = \frac{2\pi V}{\lambda \langle \sigma_{wall} \rangle} \tag{3}$$

$$Q_{ap} = \frac{2\pi V}{\lambda \langle \sigma_{ap} \rangle} \tag{4}$$

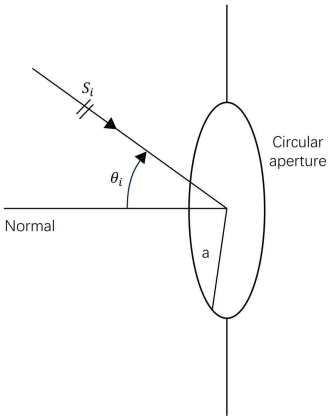

그림 2. 반지름 a인 원형 개구에 입사하는 외부 전자기장[7]
Fig. 2. External field incident on a circular aperture of radiusa[7].

V는 함체의 부피, $\langle \sigma_{wall} \rangle$은 벽 손실을 고려한 평균결합단면적, $\langle \sigma_{ap} \rangle$는 개구 손실을 고려한 평균결합단면적을 의미하며, 두 평균결합단면적은 식 (5) 및 식 (6)으로 표현된다. 또한 개구의 형상이 원형이 아닌 경우에는 동일 면적의 등가 원형 개구으로 치환하여 동일한 식을 적용한다.

$$\langle \sigma_{ap} \rangle = \begin{cases} \dfrac{16}{9\pi}\left(\dfrac{2\pi}{\lambda}\right)^4 a^6, & \left(f \le \dfrac{1.3c}{2\pi a}\right) \\ \dfrac{\pi a^2}{2}, & \left(f > \dfrac{1.3c}{2\pi a}\right) \end{cases} \tag{5}$$

$$\langle \sigma_{wall} \rangle = \frac{4\pi S}{3\lambda}\sqrt{\frac{\mu_r}{\pi f \mu_0 \sigma}} \tag{6}$$

a는 원형 개구 반지름, c는 빛의 속도, S는 구조물의 표면적, f는 주파수, μ_r는 상대투자율, μ_0는 진공의 투자율, σ는 벽의 전도도이다.

2-2 원형 개구의 전기적 크기에 따른 평균결합단면적

원형 개구 문제는 전기적으로 큰 경우와 전기적으로 작은 경우로 구분하여, 각각 근사식을 통해 단순화된 해를 도출할 수 있다. 원형 개구의 형상은 그림 2와 같다. 전기적으로 큰 원형 개구의 해는 식 (7)과 같이 표현된다[8].

$$\langle \sigma_t \rangle = \pi a^2/2 \tag{7}$$

전기적으로 작은 원형 개구의 경우, 분극률 이론

(polarizability theory)을 적용하여 결합단면적을 구한다. 식 (8)은 입사 평면에 평행(//)한 편파의 결합단면적, 식 (9)는 입사 평면에 수직(⊥)한 편파의 결합단면적을 나타내며, 식 (10)은 두 편파의 전력밀도가 동일한 무작위 입사를 가정한 평균결합단면적을 정의한다[8].

$$\sigma_{t//} = \frac{64}{27\pi} k^4 a^6 \left(1 + \frac{1}{4}\sin^2\theta\right) \tag{8}$$

$$\sigma_{t\perp} = \frac{64}{27\pi} k^4 a^6 \cos^2\theta \tag{9}$$

$$\langle \sigma_t \rangle = \frac{1}{2}\int_0^{\pi/2} (\sigma_{t//} + \sigma_{t\perp}) \sin\theta d\theta = \frac{16}{9\pi} k^4 a^6 \tag{10}$$

평균결합단면적의 연속성을 보장하기 위하여, 식 (7) 및 식 (10)을 식 (11)과 같이 서로 같다고 두고 정리하면 식 (12)와 같은 결과를 얻을 수 있다. 이는 전기적 크기 구분을 위한 임계 주파수를 나타낸다[8].

$$\pi a^2/2 = \frac{16}{9\pi} k^4 a^6 \tag{11}$$

$$f = \frac{1.3c}{2\pi a} \tag{12}$$

함체 내부에 존재하는 전력밀도는 다음과 같이 계산된다[8].

$$S_c = \frac{\langle \sigma_t \rangle \lambda Q}{2\pi V} S_i \tag{13}$$

S_c는 함체 내 전력밀도, S_i는 개구에 입사하는 전력밀도를 의미한다. 따라서 외부에서 S_i가 가해질 때 함체 내부로 투과되어 형성되는 전자기장의 크기는 S_c로 표현된다.

2-3 각도가 고려된 결합단면적

기존의 PWB 방법은 식 (7) 및 식 (10)처럼 앙상블 평균을 통해 근사하며, 이 과정에서 전자파의 방향 벡터와 위상 정보가 소거된다. 개구에 대한 입사 방향을 고려하기 위해서는 앙상블 평균을 하지 않은 결과를 사용해야 한다.

식 (14)는 식 (7)을 앙상블 평균하기 전의 형태로 입사각도 항을 가지고 있다[8].

$$\sigma_t = \pi a^2 \cos\theta \tag{14}$$

또한 그림 3과 같은 실험 조건을 만족하기 위해 식 (9)에 해당하는 수직(⊥) 편파 성분만 고려하였다. 이때 전기적 크기 구분을 위한 임계주파수는 다음 식 (15) 및 식 (16)과 같이 구할 수 있다.

$$\pi a^2 \cos\theta = \frac{64}{27\pi} k^4 a^6 \cos^2\theta \tag{15}$$

$$f = \frac{0.2273 \times c}{a \times \sqrt[4]{\cos\theta}} \tag{16}$$

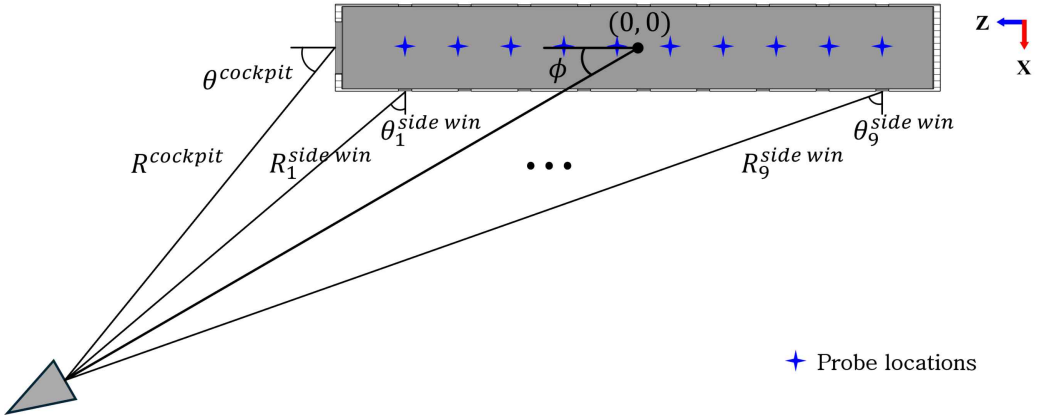

그림 3. 안테나에서 각 창문까지의 거리 및 각도
Fig. 3. Distance and angle from antenna to each window.

식 (13) 또한 앙상블 평균을 하지 않은 값을 사용하여 식 (17)과 같이 표현할 수 있다.

$$S_c = \frac{\sigma_t \lambda Q}{2\pi V} S_i \tag{17}$$

2-4 Friis-PWB Hybrid Method

PWB를 계산하기 위해서는 개구에 입사되는 전력밀도(S_i)가 필요하며, 이는 Friis 방정식으로부터 구할 수 있다.

Friis 방정식은 자유공간에서의 송·수신 전력 관계를 나타내며, 식 (18)과 같이 표현된다[9].

$$P_r = P_t G_t \frac{A_e}{4\pi R^2} \tag{18}$$

P_r는 수신 전력, P_t는 송신 전력, G_t는 송신 안테나 이득, A_e은 안테나의 실효개구면적, R은 송신 안테나에서 수신 안테나까지의 거리이다.

식 (18)에서 안테나의 실효개구면적(A_e)을 양변에 나누게 되면 식 (19)와 같이 전력밀도를 구할 수 있으며 이를 PWB에 대한 식 (20)에 대입하면 함체 내부에 들어가는 입사전력을 구할 수 있게 된다.

$$S_i = \frac{P_t G_t}{4\pi R^2} \tag{19}$$

$$P_{in} = \sigma_t S_i \tag{20}$$

그림 3과 같이 함체의 중심을 좌표평면의 원점(0, 0)으로 두고, 안테나와 함체 간의 각을 ϕ로 정의한다. 안테나에서 전면 창(cockpit window)까지의 거리와 입사각(창문 면 법선 기준)은 각각$R^{cockpit}$, $\theta^{cockpit}$로 j번째 측면 창까지의 거리와 입사각은 $R_j^{sidewin}$, $\theta_j^{sidewin}$로 표기한다. 범위는 $0° < \theta^{cockpit} < 90°$, $-90° < \theta_j^{sidewin} < 90°$로 설정한다. 계산된 R과 θ를 식 (14) 및 식 (19)에 대입하여 창문별입사전력을 구하며 이를 각 창문에 적용하면 식 (21)~식 (24)의 결과를 얻을 수 있다.

$$P^{cockpit} = \sigma^{cockpit} \times S_i^{cockpit} \tag{21}$$

$$P^{sidewin}(j) = \sigma^{sidewin}(j) \times S_i^{sidewin}(j) \tag{22}$$

$$P_t = P^{cockpit} + \sum_{j=1}^{N} P^{sidewin}(j) \tag{23}$$

$$S_c = \frac{P_t \lambda Q}{2\pi V} \tag{24}$$

$$E = \sqrt{S_c \times \eta_0} \tag{25}$$

식 (21)은 전면 창을 통해 입사되는 전력을, 식 (22)는 측면 창에 대한 전력을 나타내며, 여기서 $j = 1,2,\cdots,N$이고 본 연구에서는 N=9이다. 식 (23)은 모든 창문에 대한 값을 합산하여 총 입사전력을 구하는 식이며, 이를 식 (24)에 대입하여 최종적으로 Friis-PWB 결합 방법으로 내부 전력밀도(W/m^2) 응답을 구할 수 있다. 또한 식 (25)를 통해 식 (24)에서 구한 전력밀도를 함체 내부 전기장 세기(V/m)로 계산할 수 있게 된다.

Ⅲ. 스케일된 항공기의 제원 및 측정

3-1 A300-600 1:25 비율 축소 모델

본 연구에서는 Airbus A300-600 항공기를 1:25으로 축소한 알루미늄 함체를 사용하였으며, 함체의 외형은 그림 4와 같다. 함체의 외부 치수는 그림 5와 같이 20×138×26 cm이고, 내부 치수는 19×135×19 cm이다. 전면 창문은 12×6 cm이며, 측면 창문은 3×2 cm의 치수를 갖는다.

그림 4. A300-600 1:25 축소 함체
Fig. 4. A300-600 1:25 reduced enclosure.

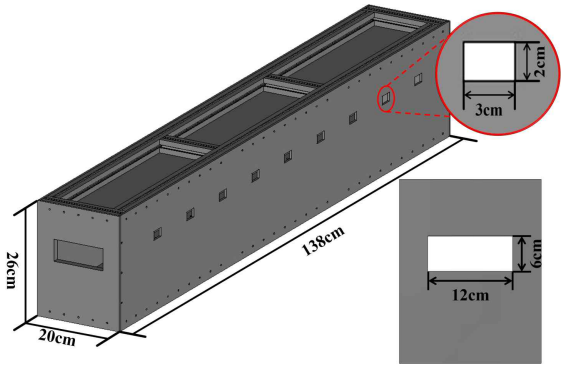

그림 5. 축소 함체의 상세 제원
Fig. 5. Detailed specifications of a miniature enclosure.

3-2 측정 환경

측정 환경 구성은 그림 6과 같다. 함체 중심에서 송신 안테나까지의 거리는 3 m, 함체 전면에서 안테나까지의 거리는 2.3 m로 설정하였다. 송신 안테나는 LB-10180-SF 광대역 혼(주파수 범위 1~18 GHz)을 사용하였고, 신호 발생기(signal generator)에서 각 측정 주파수에 대해 27 dBm을 인가하였다.

함체 내부 전기장 측정을 위해 그림 8의 EP-603 전기장 프로브를 사용하였으며, 프로브에 의한 교란을 최소화하기 위해 소형 프로브를 채택하였다. 프로브의 위치는 그림 3과 같이 함체의 각 창문의 중심에 9개 위치에서 측정하였다. 각도 의존성을 확인하고자 0도에서 90도까지 30도 간격으로 총 4개 각도(ϕ)에서 측정하였고, 주파수는 1~10 GHz 구간을 500 MHz 간격으로 측정하였다. 내부 평균 전기장은 함체 내부 9개 지점에서 측정한 값을 산술평균하여 산출하였다.

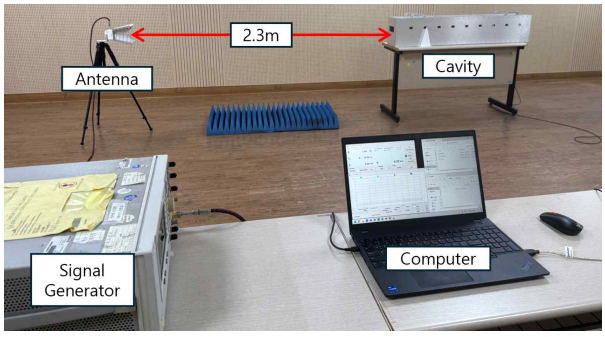

그림 6. 측정 환경 구성
Fig. 6. Measurement environment setup.

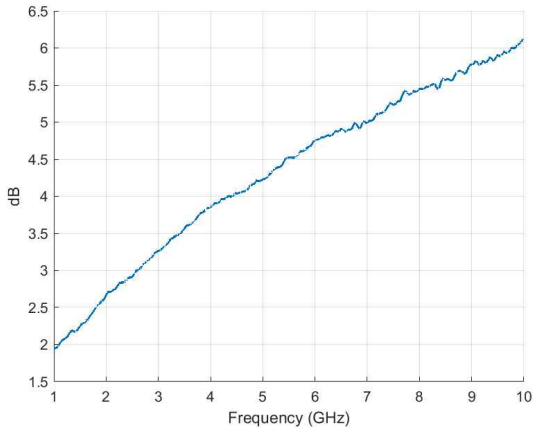

그림 7. 동축선로 손실
Fig. 7. Coaxial cable loss.

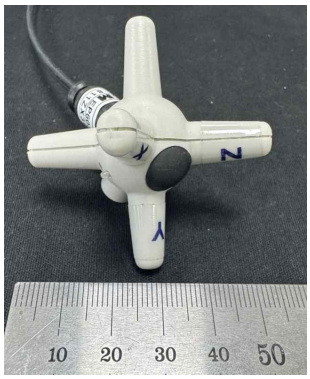

그림 8. EP-603 전기장 프로브
Fig. 8. EP-603 E-field probe.

Ⅳ. Friis-PWB와 실험 결과 비교

그림 9는 식 (24)를 통해 구한 Friis-PWB 예측값과, 그림 3 및 그림 6의 구성으로 수행한 실험 결과를 비교한 것이다. 실험 조건과의 일치를 위해 신호 발생기에서 안테나까지 연결된 선로의 손실(cable loss)은 벡터 네트워크 분석기(VNA, vector network analyzer)로 측정하여 보정값을 적용하였으며 이는 그림 7과 같다. 안테나 이득은 카탈로그 상의 알려진 값을 사용하여 식 (19)에 반영하였다.

그림 9에서의 검정색 실선은 Friis-PWB의 예측값을, 검정색 점선은 Friis-PWB의 ±5 dB 오차 허용범위를 나타낸다. ±5 dB 오차 허용범위로 둔 이유는 PWB가 본질적으로 통계적 평균 모형이어서 실측 분산이 내재하고 그에 따른

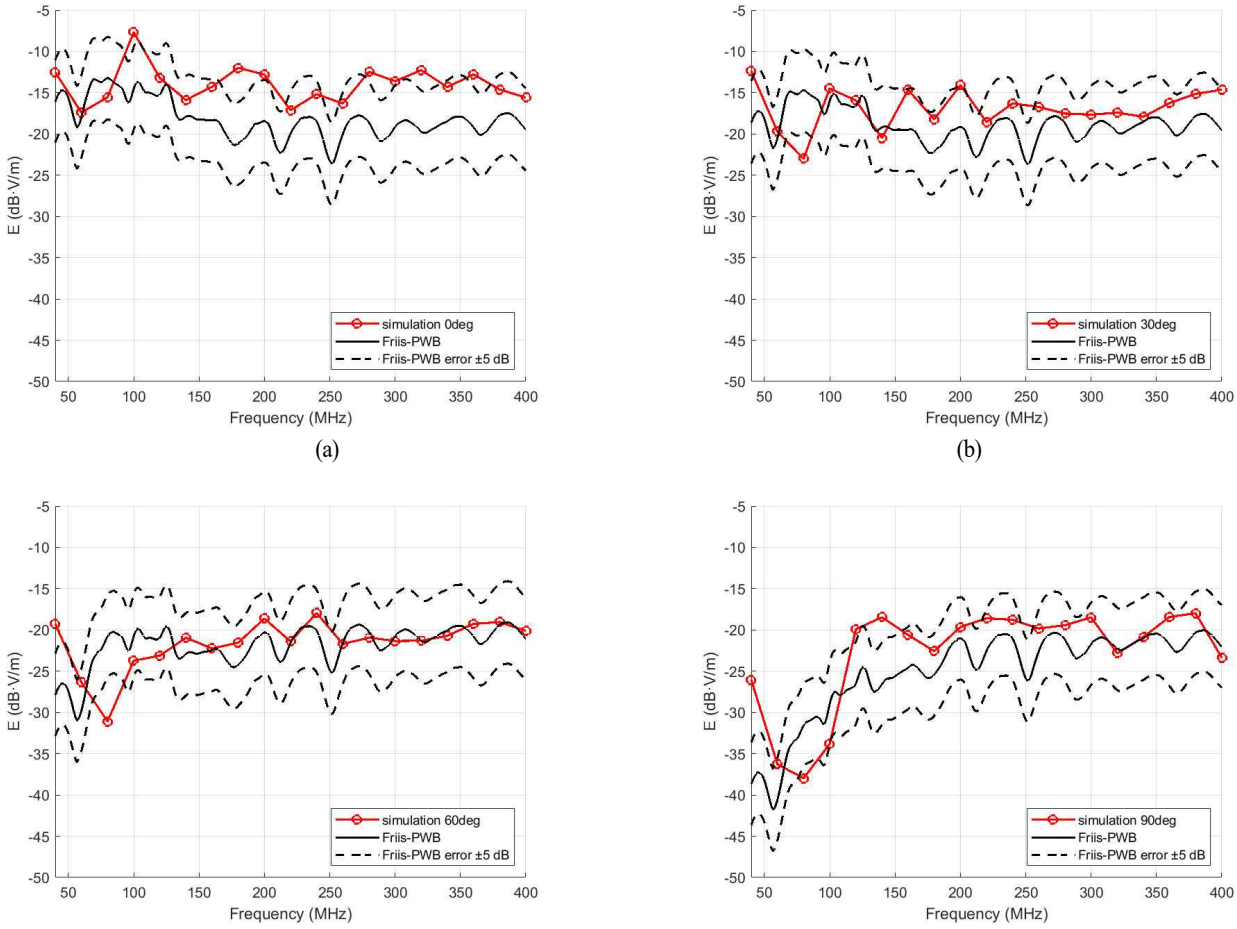

그림 9. (a) Φ=0°, (b) Φ=30°, (c) Φ=60°, and (d) Φ=90°일 때 측정값과 Friis-PWB 결과비교
Fig. 9. Comparison of measured results and Friis-PWB results for (a) Φ=0°, (b) Φ=30°, (c) Φ=60°, and (d) Φ=90°.

편차가 발생하기 때문이다. 한편 빨간색 실선(원형 마커)은 실험으로 측정한 값을 의미한다. 두 결과를 비교해 보았을때 측정한 전 대역에서 Friis-PWB 예측값과 실험값의 경향이 전반적으로 일치함을 확인할 수 있다. 또한 입사되는 각도가 커질수록 내부 전기장의 값이 낮아지는 것을 확인할 수 있다.

Ⅴ. 실제 함체 크기에 대한 시뮬레이션 검증

본 연구에서는 그림 4와 같이 실제 A300-600 항공기를 1:25 비율로 축소한 등가 모델을 구성하고 해석을 수행하였다. 이후 제안된 기법의 실제 적용 가능성을 평가하기 위해 등가 모델 형상을 유지한 채 크기만 25배 확대한 모델을 사용하여 시뮬레이션 해석을 진행하였다.

시뮬레이션은 CST 시뮬레이션 툴에서 수행되었고 FIT (finite integration technique) 기법이 이용되었다. 축소 모델의 1~10 GHz 주파수 대역은 실제 크기 기준으로 환산 시 약 40~400 MHz에 해당한다. 이에 따라 Antenna Magus를 활용하여 16~560 MHz 대역에서 동작하는 LPDA(log-periodic dipole array) 안테나를 설계 및 모델링 하였다.

실제 크기 기준으로 환산된 함체의 외형 치수는 500×

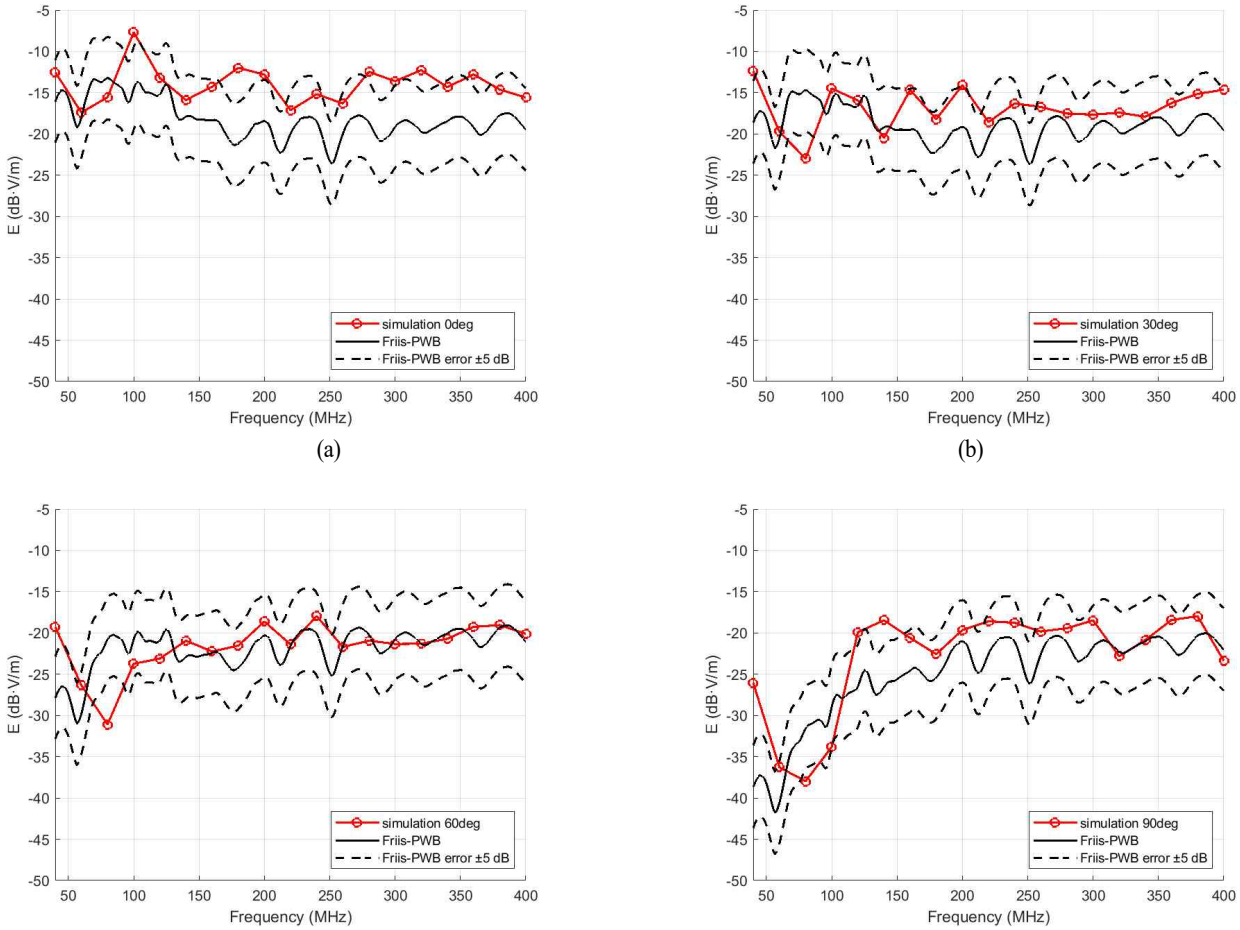

그림 10. (a) Φ=0°, (b) Φ=30°, (c) Φ=60°, and (d) Φ=90°일 때 시뮬레이션 결과와 Friis-PWB 결과비교
Fig. 10. Comparison of simulation results and Friis‐PWB results for (a) Φ=0°, (b) Φ=30°, (c) Φ=60°, and (d) Φ=90°.

3,450×650 cm이며, 내부 치수는 475×3,375×475 cm이다. 전면 창문은 300×150 cm, 측면 창문은 75×50 cm의 크기를 갖는다. 송신 안테나는 함체 중심으로부터 75 m, 전면으로부터 57.5 m 거리에 배치하였으며, 인가 전력은 27 dBm으로 설정하였다.

내부 전계 측정을 위해 축소 모델과 동일하게 함체 내부 9개 지점에 프로브를 배치하고, 각 지점의 전계 세기를 평균하여 결과를 도출하였다.

시뮬레이션 결과는 그림 10과 같으며, 시뮬레이션 결과와 Friis-PWB 모델의 오차 범위(±5 dB) 내에 수렴함을 확인하였다. 이를 통해 제안한 Friis-PWB 방법이 실제 항공기 크기에서도 유효하게 적용될 수 있음을 확인하였다.

Ⅵ. 결 론

본 논문에서는 A300-600 항공기의 1:25 축소 알루미늄 함체를 대상으로, 입사되는 각도(Φ)에 따른 내부 전기장의 세기 응답을 예측하는 수식을 도출하고 이를 실험을 통해 검증하였다. 또한 실제 크기에 대해서도 적용가능한지에 대해 시뮬레이션을 통해 확인하였다. Ⅱ장에서는 PWB의 이론과 함체로 유입되는 전력과 내부 소산 전력의 균형을 소개하고, 평균 결합단면적을 정의한 뒤 원형 개구의 전기적 크기에 따른 모델을 제시한다. 두 영역의 연속성으로 임계 주파수를 도출하고, 앙상블 평균 이전 표현을 사용해 입사각의 각도 의존성을 포함한다. 끝으로

Friis 전송식을 결합하여 창문별 입사 전력을 계산하고, 이를 PWB 식에 대입해 내부 평균 전력밀도를 예측하는 Friis-PWB를 정립한다. Ⅲ장에서는 실험 대상과 측정 환경에 대해서 설명한다. Ⅳ장에서는 Friis-PWB의 값과 실험을 통해 측정한 결과값을 비교하고 검증한다. 이론값과 실험값이 따라가는 경향이 비슷하며 크게 벗어나지 않는 모습을 볼 수 있다. Ⅴ장에서는 실제 항공기 크기에서도 유효하게 적용 가능한지에 대해 확인하기 위해 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 시뮬레이션 값이 이론값의 오차 내에 들어오며 경향이 비슷한 모습을 확인할 수 있다.

현재는 개구면에 수직(⊥) 편파만을 고려하였으며, 향후에는 개구면에 평행 편파(//)까지 포함하고, 입사 각도를 창문 법선 기준의 θ뿐만이 아니라 다른 각도까지 고려해 3차원 입사 모델로 확장하여 상하 방향 입사까지 고려한 추가 실험 및 검증을 수행할 예정이다.

References

[1] K. Park, D. Y. Hwang, S. E. Ka, J. H. Han, and J. W. Lee, "1-Port quality factor derivation method for enclosure with metallic wire mesh," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 35, no. 6, pp. 459-470, Jun. 2024.

[2] H. H. Lee, J. H. Lim, J. W. Lee, J. H. Kwon, J. H. Hwang, and C. H. Hyoung, et al., "Estimation of electromagnetic field penetration into concrete buildings using a theoretical approach considering external environmental factors," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 23, no. 3, pp. 212-223, May 2023.

[3] D. J. Lim, H. H. Lee, J. H. Lim, J. W. Lee, J. H. Kwon, and C. H. Hyoung, et al., "An improved PWB method for predicting the shielding effectiveness of large structures by electromagnetic waves," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 66, no. 4, pp. 1104-1115, Aug. 2024.

[4] J. H. Kwon, C. H. Hyoung, J. H. Hwang, H. H. Park, "Shielding effectiveness imparted by a magnetic and composite absorber placed on the inner-side of aperture of metallic enclosure," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 35, no. 4, pp. 283-286, Apr. 2024.

[5] R. Przesmycki, M. Bugaj, and M. Wnuk, "Uncertainty of measurement in HPM pulse testing," *WIT Transactions on Engineering Sciences*, vol. 125, pp. 73-84, 2019.

[6] J. H. Han, "Trends in high-power electromagnetic effects analysis technology," *The Proceedings of the Korea Electromagnetic Engineering Society*, vol. 36, no. 3, pp. 3-12, 2025.

[7] I. Junqua, J. P. Parmantier, and F. Issac, "A network formulation of the power balance method for high-frequency coupling," *Electromagnetics*, vol. 25, no. 7-8, pp. 603-622, Feb. 2005.

[8] D. A. Hill, *Electromagnetic Fields in Cavities: Deterministic and Statistical Theories,* New York, NY, John Wiley & Sons, 2009.

[9] H. T. Friis, "A note on a simple transmission formula," *Proceedings of the IRE*, vol. 34, no. 5, pp. 254-256, May 1946.

황 대 영 [한국항공대학교/석사과정]
https://orcid.org/0009-0001-4680-7307

2021년 2월: 한국해양대학교 전파공학과 (공학사)
2023년 9월～현재: 한국항공대학교 항공전자정보공학과 석사과정
[주 관심분야] 마이크로파 및 밀리미터파, EMI/EMC 대책 기술, 전자장 수치해석

최 준 영 [한국항공대학교/학사과정]
https://orcid.org/0009-0009-7686-8715

2020년 3월～현재: 한국항공대학교 항공전자정보공학과 학사과정
[주 관심분야] EMI/EMC/EMP, 전자파 해석 기법, 마이크로파 및 밀리미터파

한 정 훈 [한국항공대학교/조교수]
https://orcid.org/0000-0002-3721-7700

2009년 2월: 경북대학교 전기 및 전자공학과 (공학사)
2011년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
2014년 4월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
2014년 3월～2020년 2월: 한국전자통신연구원 산하 연구 기관
2021년 3월～2024년 2월: 제주대학교 전파통신공학과 조교수
2024년 3월～현재: 한국항공대학교 항공전자정보공학과 조교수
[주 관심분야] 안테나 시스템, 전자파 해석기법, 고출력 전자파, 전자파보안, 레이다 시스템 등

이 재 욱 [한국항공대학교/교수]
https://orcid.org/0000-0003-2903-5904

1992년 2월: 한양대학교 전자공학과 (공학사)
1994년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
1998년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
1998년 3월～2004년 2월: 한국전자통신연구원 디지털방송연구단 전파기반연구그룹
2004년 3월～현재: 한국항공대학교 항공전자정보공학과 교수
[주 관심분야] 마이크로파 및 밀리미터파, 능·수동 소자 해석 및 설계, EMI/EMC 대책 기술, 고출력 증폭기 및 고출력 안테나 설계, 위성 통신 안테나, 전자장 수치 해석 등