

금속 메쉬 면을 포함한 함체에 대한 1-포트 품질계수 도출 방법

1-Port Quality Factor Derivation Method for Enclosure with Metallic Wire Mesh

박기태 · 황대영 · 가승은 · 한정훈 · 이재욱

Kitae Park · Dae-Young Hwang · Seung-Eun Ka · Jung-Hoon Han · Jae Wook Lee

요 약

본 논문은 금속 메쉬 면을 포함한 함체의 평가를 위한 품질계수 도출 연구를 수행한다. 금속 메쉬 면의 전기적 특성은 등가 표면 임피던스 변환을 통해서 알 수 있으며, 이를 통해 금속 메쉬 면의 산란특성 분석 후 함체를 제작했다. 함체의 품질계수 도출은 1-포트로 결합된 단일 표준 안테나의 측정을 통해 간단히 수행 가능하다. 1-포트 시간영역 품질계수 도출 방법에 대한 유효성을 검증하기 위해서 상용 프로그램인 CST microwave studio의 FIT(finite integration technique)를 활용한 수치해석 시뮬레이션이 수행되었다. 검증된 품질계수 도출 방법을 금속 메쉬 면이 포함된 함체에 대하여 실제로 적용하였다. 함체에 개구면이 존재하는 경우(open)와 함체의 한 면이 금속 메쉬 면인 경우(mesh), 함체의 모든 면이 금속으로 닫힌 경우(closed)에 대한 품질계수 측정 실험을 각각 수행하였다. 측정 결과, 개구면이 존재하는 경우의 품질계수가 26.82 dB로 가장 낮았고, 다음으로 한 면이 금속 메쉬 면인 경우 32.24 dB, 모든 면이 금속으로 닫힌 경우의 품질계수는 32.51 dB로 가장 높았다.

Abstract

This study was conducted to derive a quality factor for the evaluation of an enclosure with a metallic wire mesh. The electrical characteristics of the metal mesh surface can be determined through equivalent surface impedance conversion; thus, an enclosure was manufactured after analyzing the scattering parameters of the metallic wire mesh surface. The quality factor of the enclosure can be derived simply by measuring a single standard antenna bonded by 1-port. To verify the effectiveness of the 1-port time domain quality factor derivation method, a numerical simulation was performed using the Finite Integration Technique (FIT) of commercially available software CST Microwave Studio. The verified quality-factor derivation method was applied to an enclosure with a metallic wire mesh surface. A quality factor measurement experiment was performed for the case in which one side of the enclosure was in the opening surface, one side of the enclosure was a metallic wire mesh surface, and all the surfaces of the enclosure were closed with metal. Based on the measurements, the quality factor in the case of Open was the lowest at 26.82 dB, followed by 32.24 dB for the case of Mesh and 32.51 dB for the case of Closed.

Key words: Electromagnetic Compatibility, Electromagnetic Security, Electromagnetic Coupling Estimation, Quality Factor, Metal Mesh

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

한국항공대학교 항공전자정보공학부(Department of Electronic Engineering, Korea Aerospace University)

· Manuscript received April 29, 2024 ; Revised May 2, 2024 ; Accepted June 4, 2024. (ID No. 20240429-047)

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

I. 서 론

고출력 전자파에 대한 잠재적인 위협이 높아짐에 따라 이에 대한 방호 대책이 다방면으로 요구되고 있다. 고출력 전자파 공격은 핵 폭발에 의해 발생하는 핵 EMP (electromagnetic pulse)와 의도성 전자파 방해(IEMI, intentional electromagnetic interference)를 포함하는 비핵 EMP로 구분된다^[1]. 고출력 전자파 공격은 전자파를 활용하는 국가 중요 기반인 통신/네트워크 장비, 서버 시설, 발전 시설 등에 심각한 피해를 끼칠 수 있다. 각종 전자파 공격으로부터 중요 시설 및 장비에 대한 피해 방지 대책으로는 방호 시설의 설계, 접지, 시설에 대한 금속 메쉬 구조와 같은 차폐 망의 적용 등이 제안된 바 있다^{[2]~[4]}.

금속 메쉬 구조는 직교하는 와이어가 무수히 짜여진 구조에 의해 형성된 개구의 크기보다 큰 파장을 가지는 대역에서 효과적인 차폐 성능을 가진다^{[5],[6]}. 또한 효과적인 차폐 성능을 가진다는 점 외에 몇 가지 장점들을 가지는데, 대표적으로는 메쉬 벽면 너머를 광학적으로 관찰할 수 있다는 점이다. 그래서 전자파 차폐 합체 등의 구조물에서 내부와 외부 사이를 광학적으로 관찰할 수 있는 창호의 설계를 위해 금속 메쉬 구조가 널리 채택된다^{[2],[4]}. 한편으로, 메쉬 구조의 전자파 특성을 파악하기 위한 방법은 공간 평균 표면 전류 밀도와 공간 평균 접선 전기장으로 유도되는 등가 표면 임피던스를 사용한 수식 모델링이 제안된 바 있다^[5]. 등가 표면 임피던스 모델링은 반사판 안테나, 전자파 차폐함 등 다양한 분야의 금속 메쉬 구조를 해석하기 위하여 사용될 수 있다^{[5]~[7]}.

설계된 방호시설의 성능은 시설의 품질계수로서 평가될 수 있다^[8]. 품질계수는 시설 내부에 단위시간 동안 저장된 전력과 소모된 전력의 비율로 정해지며^[8], 차폐효과와 비례하는 관계를 가지는 것으로 알려져 있다^[9]. 품질계수는 잔향실, 무반향실 등의 환경에서 다양한 방법을 사용해 측정될 수 있다^{[10]~[13]}.

본 논문에서는 기존에 제안된 여러 품질계수 도출 방법 중 활용성이 우수한 1-포트 시간영역 품질계수 도출 방법을 응용한다^{[10]~[13]}. 참고문헌 [11]에서는 임의의 개구를 가지는 합체의 1-포트 시간 축 산란계수 측정을 사용한 품질계수와 차폐효과 도출 방법을 제안하였다. 이

때 측정은 잔향실에서 수행된다. 참고문헌 [12]에서는 합체 내부에 안테나가 존재하는 참고문헌 [11]과 달리 합체에 내부에 안테나를 위치시키지 않더라도 품질계수와 차폐효과를 도출할 수 있는 방법을 제안하였다. 이 때 합체는 잔향실 내부에 위치하며, 잔향실에는 송신 안테나와 수신 안테나가 위치한다. 참고문헌 [13]에서는 1-포트 품질계수 도출 방법을 위해 요구되는 산란계수의 측정 대역폭에 대한 연구가 수행되었다. 연구는 5.5~7 GHz의 C 밴드 대역에서 수행되었다. 동일 중심주파수를 갖는 다양한 대역폭(5, 2.5, 1, 0.625 GHz)의 산란계수로부터 품질계수를 도출하여 비교하였다. 비교 결과 도출된 품질계수에 대한 대역폭의 영향은 적다는 결과를 확인한다. 본 논문에서는 기존 방법^{[11]~[13]}을 무반향실에서의 금속 메쉬 면을 포함한 합체의 품질 계수 도출 방법에 적용한다.

본 논문의 II 장에서는 의도적 전자파 장애의 위협이 존재하는 C 밴드 대역에서의 OPI(opening per inch)에 대한 금속 메쉬 구조의 투과 및 반사 특성을 파악한다. OPI는 금속 메쉬 구조의 개구면의 크기를 나타내는 사양으로 1 inch(25.4 mm) 내에 존재하는 금속 메쉬 구조의 개구의 개수를 나타낸다. 투과 및 반사 특성은 금속 메쉬 구조에 대한 등가 표면 임피던스 모델링을 통해 이론적으로 파악된다^{[5],[6]}. 등가 표면 임피던스 모델링을 통해 합체 제작에 사용된 금속 메쉬 구조에 대한 투과 및 반사 특성을 사전에 분석하고, 금속 메쉬 면을 가지는 합체를 제작한다. III 장에서는 품질계수의 정의, 합체의 품질계수, 그리고 합체를 구성하는 요소에 대한 품질계수를 소개한다. 다음으로 품질계수의 정의를 사용한 1-포트 품질계수의 도출 방법을 설명한다. 1-포트 품질계수 도출 방법은 상용 시뮬레이션 프로그램 CST 기반의 수치해석을 통해 검증된다. 최종적으로 앞서 제작된 금속 메쉬 면을 가지는 합체에 대한 1-포트 시간영역 산란계수 도출법을 사용한 실제 실험을 수행하였고, 측정 결과를 분석 및 검증한다.

II. 금속 메쉬 면을 포함한 합체

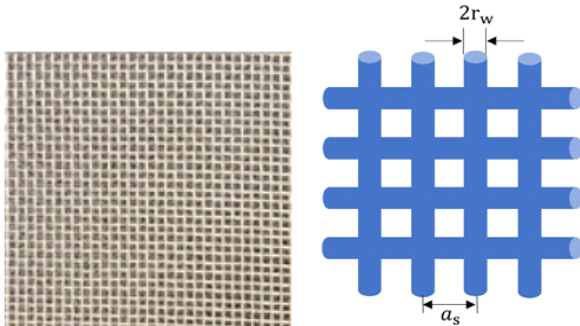
2-1 금속 메쉬 면의 산란 특성

본 장은 의도적 전자파 장애가 존재할 수 있는 5 GHz 대역의 금속 메쉬 면에 대한 반사 및 투과 특성을 파악하

기 위한 등가 표면 임피던스 모델링을 수행한다^[5].

그림 1(a)는 논문에서 사용한 24 OPI의 사양을 가진 알루미늄 메쉬이다. 등가 표면 임피던스 모델링을 위해서는 이러한 실제 금속 메쉬에 대해 그림 1(b)와 같은 와이어의 격자 모델링이 고려된다. 이 때, 금속 메쉬의 와이어 직경을 $2r_w$, 정사각형 형태인 유닛셀 한 변의 길이를 a_s 로 설정한다. 이 때 1 inch(25.4 mm)에 a_s 를 나눠 OPI를 계산할 수 있다. 그림 2는 각각 금속 메쉬 면으로 입사하는 수직, 평행 편광 평면파의 입사각에 대한 기하 구조를 나타낸다.

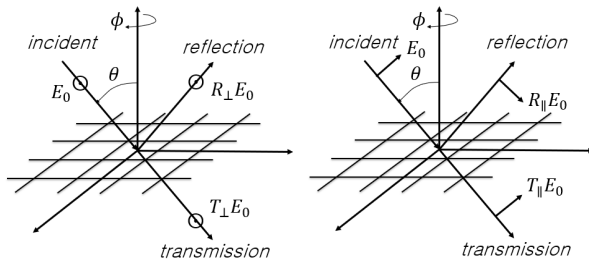
식 (1) 및 식 (2)는 금속 메쉬 면에 대한 수직 편광 평면파의 입사각 θ 에 따른 반사계수와 투과계수이다. Z_{s1} 은



(a) 24 OPI 알루미늄 메쉬 (b) 와이어 격자 모델링
(a) 24 OPI aluminium mesh (b) Wire grid modeling

그림 1. 24 OPI 알루미늄 메쉬와 원통형 와이어의 격자 모델링

Fig. 1. 24 OPI aluminium mesh and wire grid modeling.



(a) 수직 편광 (b) 평행 편광
(a) Perpendicular polarization (b) Parallel polarization

그림 2. 메쉬 면에 입사하는 평면파에 따른 반사 및 투과파 기하 구조

Fig. 2. Geometry of reflection and transmission wave according to plane wave incident on mesh surface.

수직 편광 평면파에 대한 등가 표면 임피던스이고, $2r_w$, a_s , 와이어의 전기전도도 등으로 계산될 수 있다^[5]. 와이어의 전기전도도는 알루미늄의 경우를 가정하였다.

$$R_{\perp}(\theta) = \frac{-1}{1 + 2(Z_{s1}/Z_0)\cos(\theta)} \quad (1)$$

$$T_{\perp}(\theta) = \frac{2(Z_{s1}/Z_0)\cos(\theta)}{1 + 2(Z_{s1}/Z_0)\cos(\theta)} \quad (2)$$

식 (3) 및 식 (4)는 금속 메쉬 면에 대한 평행 편광 평면파의 입사각 θ 에 따른 반사계수와 투과계수이다. Z_{s2} 는 평행 편광 평면파에 대한 등가 표면 임피던스이고, Z_{s1} 과 θ 로 계산될 수 있다^[5].

$$R_{\parallel}(\theta) = \frac{\cos(\theta)}{2(Z_{s2}/Z_0) + \cos(\theta)} \quad (3)$$

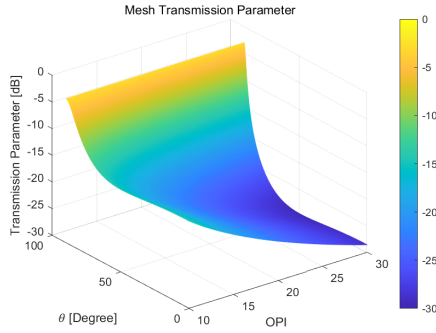
$$T_{\parallel}(\theta) = \frac{2(Z_{s2}/Z_0)}{2(Z_{s2}/Z_0) + \cos(\theta)} \quad (4)$$

앞선 식 (1) 및 식 (3)의 결과를 평균하여 편파의 영향을 무시한 투과계수는 식 (5)와 같으며, 식 (2) 및 식 (4)의 결과를 평균하여 편파의 영향을 무시한 반사계수는 식 (6)과 같다. 이때, 메쉬 면의 유닛셀 형태를 정사각 구조로 가정하기 때문에 투과계수와 반사계수는 ϕ 에 대해 독립적이다.

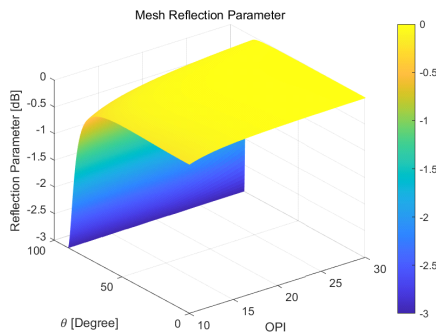
$$R(\theta) = 10\log\left(\frac{1}{2} |R_{\perp}(\theta)|^2 + \frac{1}{2} |R_{\parallel}(\theta)|^2\right) \quad (5)$$

$$T(\theta) = 10\log\left(\frac{1}{2} |T_{\perp}(\theta)|^2 + \frac{1}{2} |T_{\parallel}(\theta)|^2\right) \quad (6)$$

그림 3은 입사각도 θ 와 OPI에 따른 식 (5) 및 식 (6)의 결과를 나타낸다. 이 때 주파수 대역은 C 밴드에 속해 있는 5 GHz 대역이고, r_w 는 0.05 mm를 가정했다. 계산 결과에 따르면 OPI와 투과계수는 반비례하는 경향을 보이며, 반사계수와는 비례하는 경향을 보인다. 또한 금속 메쉬 면에 수직과 가까운 각도로 입사할수록 투과계수는 작아지고, 반사계수는 커지는 경향이 확인된다. 다만, 입사 각도가 금속 메쉬 면 쪽으로 기울어질수록 투과계수는 커지고, 반사계수는 작아진다. 이 경우, 입사 각도가 메쉬 면 쪽으로 기울어질 때 전자파가 입사되는 결합 단



(a) 투과계수 분포
(a) Distribution of transmission parameter



(b) 반사계수 분포
(b) Distribution of reflection parameter

그림 3. 메쉬 면의 산란계수 분포

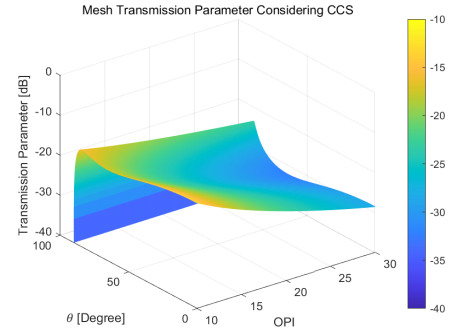
Fig. 3. Distribution of scattering parameter for mesh surface.

면적도 작아지기 때문에 투과 및 반사계수가 0에 수렴하여 그 영향이 무시될 수 있다. 결합 단면적은 결합현상이 일어나는 개구의 면적을 각도에 따라서 계산한 값으로 입사각이 커질수록 결합 단면적은 작아진다. 그림 4(a) 및 그림 4(b)는 각각 식 (5) 및 식 (6)에 결합 단면적을 곱해 준 결과이다.

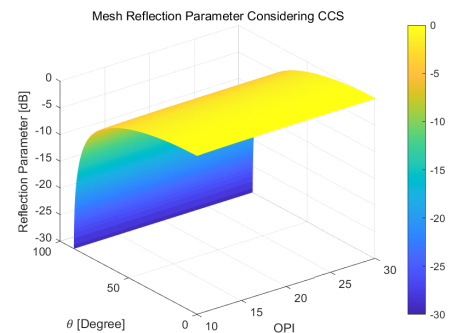
등가 표면 임피던스 모델링에 의하면 그림 2(a)의 금속 메쉬 면은 수직입사를 가정할 시 투과계수 -25 dB, 반사계수 -0.018 dB로 전자파 차폐에 유리한 특성을 가진다.

2-2 금속 메쉬 면을 포함한 함체

본 논문에서 사용된 금속 메쉬 면을 가지는 함체는 그림 5와 같다. 함체의 금속 메쉬 면에는 앞서 소개된 그림 2(a)의 24 OPI의 사양을 가진 알루미늄 메쉬가 사용되었다. 함체는 대략 $38,160,000$ S/m²의 전기전도도를 가지는



(a) 결합 단면적을 고려한 투과계수 분포
(a) Distribution of transmission parameter considering coupling cross section



(b) 결합 단면적을 고려한 반사계수 분포
(b) Distribution of reflection parameter considering coupling cross section

그림 4. 결합 단면적을 고려한 메쉬 면의 산란계수 분포

Fig. 4. Distribution of scattering parameters for mesh surface considering coupling cross section.

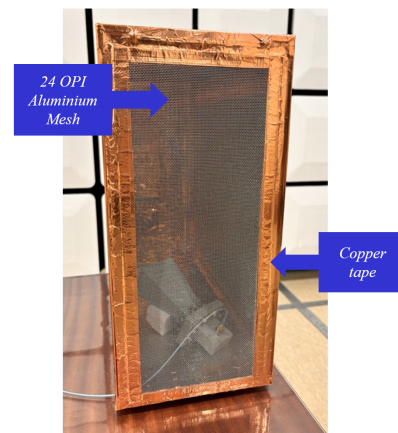


그림 5. 금속 메쉬 면을 포함한 함체

Fig. 5. Enclosure with metallic wire mesh.

알루미늄으로 제작된 컴퓨터 케이스의 구성품을 분해하여 제작되었으며, 함체에 동축 케이블을 삽입하기 위한 개구를 제외한 나머지 개구는 대략 $58,130,000 \text{ S/m}^2$ 의 전기전도도를 가지는 구리 테이프를 사용하여 모두 차폐하였다. 동축 케이블을 삽입하기 위한 개구 역시 동축 케이블 삽입 후 구리 테이프를 사용해 차폐하였다. 금속 메쉬 면은 구리 테이프를 사용해 함체에 부착하였다. 함체는 가로 170 mm, 세로 490 mm, 높이 440 mm의 크기를 가지고, 전면의 금속 메쉬 면의 크기는 가로 150 mm, 세로 380 mm이다.

III. 품질계수 도출 방법 및 결과

3-1 1-포트 시간영역 품질계수 도출 방법

함체의 모든 요소를 포함하는 품질계수는 식 (7)과 같이 단위시간(T) 당 함체 내부에 저장된 에너지 W_s 와 손실된 에너지 W_d 의 비율로 정의된다. 이 때 식 (7)의 W_d 에서 단위시간 T 를 분리시켜 주파수 항으로 변환시켜줄 수 있고, 저장된 에너지 W_s 와 손실된 전력 P_d 의 비율로 챔버의 시상수 τ_{RC} 가 정의된다^{[10]~[13]}.

$$Q = 2\pi \frac{W_s}{W_d} = 2\pi \frac{W_s}{TP_d} = w \frac{W_s}{P_d} = w\tau_{RC} \quad (7)$$

챔버 시상수는 함체 내의 전력이 자연 상수의 역수만큼 감쇠되기까지의 시간으로 식 (8)과 같다.

$$\tau_{RC} = \frac{4.3429}{\text{slope}(dB/\mu s)} \mu s \quad (8)$$

식 (8)의 기울기 (slope)는 함체 내에 안테나를 삽입하여 측정된 시간 축 산란계수(S_{11})의 감쇠 속도를 의미한다^{[10]~[13]}. 이때 시간 축 산란계수(S_{11})를 얻기 위한 주파수 축 산란계수(S_{11})의 시간 축으로의 역 푸리에 변환은 Copper Mountain Technologies사의 산란계수 분석 프로그램 S2VNA를 사용하여 수행되었다^[14]. 또한, 프로그램 내에서 신호의 왕복을 가정하여 역푸리에 변환 시 시간 간격이 대역폭의 역수가 되도록 설정하였다^{[13],[14]}.

한편으로 함체의 모든 요소를 포함하는 품질계수 식 (7)은 식 (9)와 같이 함체를 구성하는 요소 각각에 대한

품질계수들의 병렬 합으로 표현 가능하다^[8].

$$Q = (Q_W^{-1} + Q_{Antenna}^{-1})^{-1} \quad (9)$$

Q_W 은 함체 자체의 품질계수, $Q_{Antenna}$ 는 함체 내부의 안테나의 품질계수이다. 각 품질계수의 값은 다음과 같다^[8].

$$Q_W = \frac{3V}{2\mu_r \delta A}, \delta = \sqrt{\frac{2}{w\mu_r \sigma}} \quad (10)$$

$$Q_{Antenna} = \frac{16\pi^2 V}{m\lambda^3} \quad (11)$$

V 는 함체의 부피, A 는 함체의 표면적이다. 식 (10)의 μ_r 는 벽의 유효투자율, σ 는 벽의 전기전도도, δ 는 매질의 침투깊이로 함체의 매질이 양도체임을 가정한다^[8]. 식 (11)의 m 은 안테나의 임피던스 부정합 계수로 정합된 안테나의 경우 1의 값을 가진다^[8].

측정 가능한 식 (7)과 계산 가능한 식 (11)을 식 (9)에 대입하여 안테나의 영향이 제외된 함체 자체의 품질계수가 식 (12)로 도출될 수 있고, 본 논문에서는 이 값을 도출하는 방법을 1-포트 시간영역 품질계수 도출 방법으로 부른다.

$$Q_W = (Q^{-1} - Q_{Antenna}^{-1})^{-1} \quad (12)$$

3-2 사용된 방법의 수치해석 시뮬레이션 검증

1-포트 시간영역 품질계수 도출 방법에 대한 유효성을 검증하기 위한 수치해석 시뮬레이션이 수행되었다. 시뮬레이션 수행을 위해 그림 6과 같이 함체 내부에 WR-159 규격의 표준 이득 혼 안테나(WR-159 standard gain horn antenna)와 교반기(mode stirrer)를 위치시킨 모델링이 고려되었다. 함체의 크기는 앞서 제작된 함체를 모사하였고, 그림 6에 표기하였다. 함체의 매질은 상대적으로 낮은 반사계수를 가지는 전기전도도가 10 S/m^2 인 매질부터 높은 반사계수를 가지는 전기전도도가 $100,000 \text{ S/m}^2$ 인 매질까지 특성을 바꾸어가며 10배 간격으로 설정하였다. 교반기는 함체 내부의 잔향 현상을 높이기 위해 설치하였고, 교반기가 존재하는 경우와 존재하지 않는 경우를 모두 고려하였다. 교반기는 자체적인 손실이 없도록 하기 위해서 매질을 완전 도체로 설정했다. 안테나의 위치는 국제표준

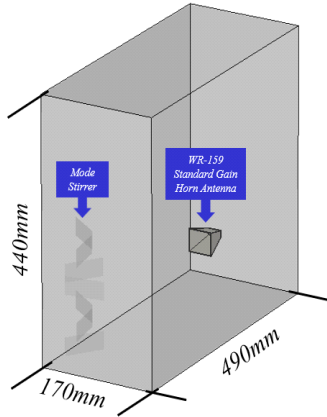
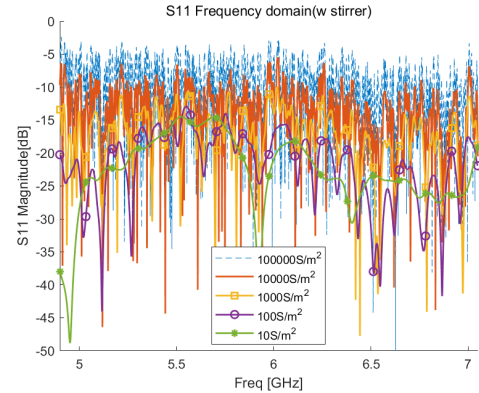


그림 6. 검증용 시뮬레이션 모델
Fig. 6. Simulation model for verification.

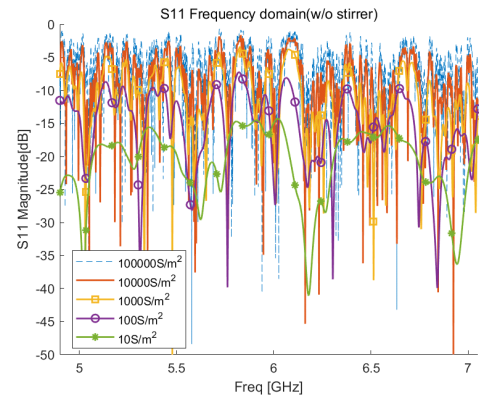
IEC 61000-4-21에서 정해진 잔향실 동작 구역(working volume)인 벽으로부터 $\lambda/4$ 떨어진 구역에 위치시켰다^[15].

수치해석은 상용 시뮬레이션 프로그램 CST microwave studio의 FIT(finite integration technique) 방법이 사용되었다. 시뮬레이션의 해석 대역은 C 밴드의 주파수를 포함하는 WR-159 규격의 주파수인 4.9~7.05 GHz로 설정되었다. 시뮬레이션은 관측 시간이 4,000 ns이거나, -100 dB의 정확도를 가질 때 종료되도록 설정되었다. 시뮬레이션은 Intel Xeon w9-3495X(56코어 112스레드, 4.8 GHz 클럭 주파수), 256 Gb 메모리, A4000 가속기 환경에서 수행되었으며, 해석시간은 교반기가 존재하는 경우, 23,257 초, 교반기가 존재하지 않는 경우 20,651초가 소요되었다.

시뮬레이션으로 얻어진 주파수 축 산란계수(S_{11})는 그림 7과 같다. 매질이 낮은 전기전도도를 가지는 경우 신호 세기의 변동이 적고, 높은 전기전도도를 가질수록 더 많은 신호 세기의 변동을 가진다. 식 (10)에 의하면 함체의 벽면의 전기전도도와 품질계수는 비례한다. 또한, 함체의 벽면의 품질계수가 커질수록 함체 내의 단위시간당 전력손실은 줄어든다. 따라서 함체의 전기전도도가 높을수록 함체 내의 신호가 긴 시간동안 적은 손실로 보존되어 다양한 경로 길이를 가진다. 그림 7의 신호의 세기의 변동은 이러한 이유 때문으로, 이는 주파수 축 산란계수(S_{11})를 그림 8의 시간 축 산란계수로 변환시켜 더 쉽게 확인할 수 있다. 그림 8의 시간 축 산란계수(S_{11})는 교반기



(a) 교반기가 존재하는 경우
(a) With stirrer



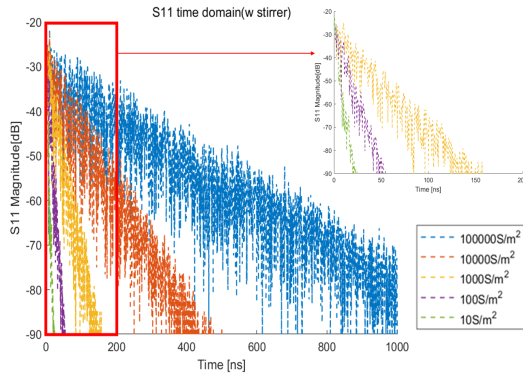
(b) 교반기가 존재하지 않는 경우
(b) Without stirrer

그림 7. 시뮬레이션의 주파수 영역 산란계수 S_{11}

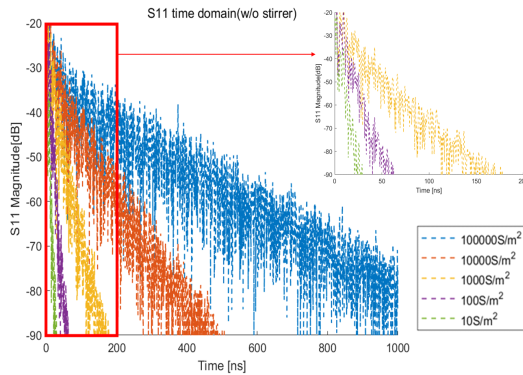
Fig. 7. Scattering parameter S_{11} of simulation in frequency domain.

의 여부와 상관없이 함체 벽면의 전기전도도가 높을수록 더 긴 시간 동안 함체 내에 존재한다.

함체의 모든 요소를 포함하는 품질계수는 그림 8의 시간 축 산란계수(S_{11})가 일정한 기울기를 가지는 범위에서 구해진 식 (8)의 기울기(slope) 값을 통해 도출될 수 있다. 함체 벽면의 전기전도도에 따른 일정한 기울기를 가지는 범위는 표 1의 사용된 구간(used range)으로 표기하였다. 기울기(slope)는 사용된 구간 내에서의 선형 적합(linear-fitting)을 통해 계산하였다. 기울기(slope)는 식 (8) 및 식 (7)을 통해 챔버 시상수, 함체 전체의 품질계수 순으로 계산하였고, 최종적으로 식 (12)를 통해 안테나의 영향이 제



(a) 교반기가 존재하는 경우
(a) With stirrer



(b) 교반기가 존재하지 않는 경우
(b) Without stirrer

그림 8. 시뮬레이션의 시간 영역 산란계수 S_{11}
Fig. 8. Scattering parameter S_{11} of simulation in time domain.

외된 합체 자체의 품질계수로 계산하였다. 이는 표 1의 1-포트 시간영역 품질계수(1-port time domain quality factor)로 표기했다. 시뮬레이션으로 도출된 1-포트 시간영역 품질계수는 표 1의 식 (10)으로 계산된 이론적인 합체의 품질계수(theoretical quality factor)를 기준으로 비교하여 오차를 분석할 수 있다. 1-포트 시간영역 품질계수 도출 결과는 전기전도도가 10 S/m²로 낮은 경우 교반기의 유무에 대한 영향이 높아 교반기가 없는 경우 약 32.7 %의 오차를 보였다. 다만, 전기 전도도가 높은 나머지 경우에는 오차가 5.4 % 이하의 낮은 값을 가졌다. 논문에서 제작된 합체가 금속성임을 감안할 때 1-포트 시간영역 품질계수

표 1. 중심주파수(5.975 GHz)에서 전기전도도에 따라 도출된 품질계수

Table 1. Simulated quality factor in center frequency(5.975 GHz) according to the electrical conductivity.

Electrical conductivity [S/m ²]	Used range [ns]	Theoretical quality factor (10) [dB]	1-port time domain quality factor (12) [dB]	
			w stirrer	w/o stirrer
10	4~10	16.04	15.81	21.28
100	4~40	21.04	21.57	21.01
1,000	60~140	26.04	26.47	26.93
10,000	60~400	31.04	31.58	31.80
100,000	60~1,000	36.04	37.92	37.99

도출 방법의 오차는 대략적으로 5.4 % 내에서 유효한 것으로 판단된다.

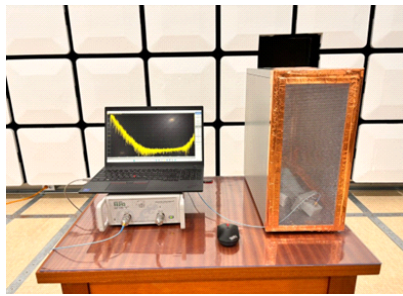
3.3 측정 환경 및 측정 결과

실제 금속 메쉬 면이 포함된 합체의 품질계수 측정을 위한 실험이 수행되었다. 측정 환경은 무반향실(한국전파진흥협회 제공)이고, 측정에 사용된 안테나는 검증을 위해 진행한 시뮬레이션 환경과 동일한 WR-159 규격의 10 dB 이득을 가지는 표준 이득 혼 안테나이다. 안테나는 4 cm 높이의 스티로폼 블럭을 사용하여 동작 구역에 위치시켰다^[15]. 또한 직접 반사파의 영향을 줄이기 위하여 비스듬한 각도로 벽을 향하게 배치했다^[15]. 산란계수는 Copper Mountain Technologies사의 S-5234 벡터네트워크 분석기(RT-테크 제공)를 사용해 측정되었다. 측정은 합체의 개구면이 열린 경우(open), 한 면이 금속 메쉬인 경우(mesh), 금속 호일로 닫힌 경우(closed) 총 세 가지로 각각 그림 9(a)~그림 9(c)와 같다. 금속 메쉬와 금속 호일은 구리 테이프를 사용하여 합체에 장착되었다. 품질계수의 측정 방법으로는 앞서 유사 환경에 대하여 시뮬레이션 검증된 1-포트 시간영역 품질계수 도출 방법이 사용되었다.

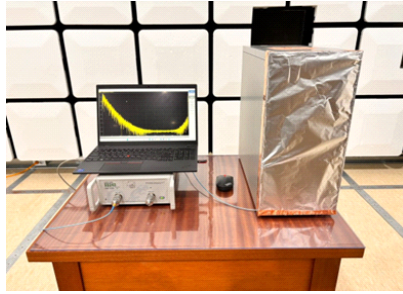
그림 10은 측정된 주파수 축 산란계수(S_{11})를 나타낸다. 그림 11은 시간 축으로 변환된 산란계수(S_{11})이고 이와 함께 선형 적합의 결과도 같이 표시되었다. 선형 적합을 통해 계산된 기울기(slope)는 식 (7) 및 식 (8)을 통해 챔버



(a) 함체에 개구면이 존재하는 경우(open)
(a) Enclosure with open side (open)



(b) 함체의 한 면이 금속 메쉬 면인 경우(mesh)
(b) Enclosure with meshed side (mesh)



(c) 함체가 금속으로 닫힌 경우(closed)
(c) Enclosure with closed side (closed)

그림 9. 품질계수 측정 환경

Fig. 9. Quality factor measurement environment.

시상수(τ_{RC}), 품질계수로 순으로 계산하였다. 계산 결과는 표 2의 1-포트 시간영역 품질계수(1-port time domain quality factor)로 표기했다. 함체의 품질계수 도출 결과는 개구면이 존재하는 경우 가장 낮은 26.82 dB이고, 금속 메쉬 면을 가지는 경우 32.24 dB, 금속으로 닫힌 경우 32.51 dB로 개구면이 존재하는 경우 손실이 가장 크고, 다음으로 금속 메쉬 벽면에 의한 손실, 금속 순으로 손실

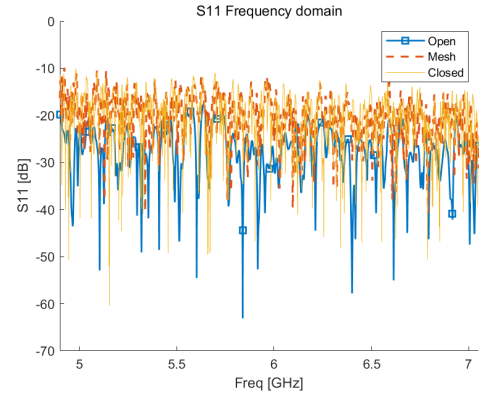


그림 10. 측정의 주파수 영역 산란계수 S_{11}

Fig. 10. Scattering parameter S_{11} of measurement in frequency domain.

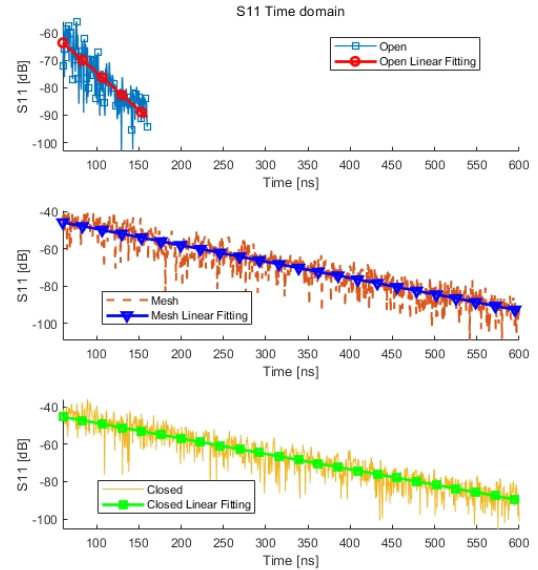


그림 11. 측정의 시간 영역 산란계수 S_{11}

Fig. 11. Scattering parameter S_{11} of measurement in time domain.

이 작아짐을 나타낸다. 다만, 실제 측정 환경에는 이상적인 환경에서 수행된 시뮬레이션과 다르게 함체 내의 케이블, 도장 처리된 안테나 표면, 함체 내의 공기의 온/습도 등 여러 오차 요인이 존재한다는 한계가 존재한다. 앞서 서술된 오차 요인은 함체 내부에서 유한한 품질계수를 가진다. 이는 함체 내부의 단위시간 당 손실이 더 커지는 영향을 끼친다. 따라서 실제 측정에 의해 도출된 품질

표 2. Center frequency(5.975 GHz)의 함체의 품질계수
Table 2. Quality factor of enclosure in center frequency (5.975 GHz).

Case	Used range [ns]	1-port time domain quality factor (12) [dB]
Open	60~140	26.82
Mesh	60~600	32.24
Closed	60~600	32.51

계수의 값이 이상적인 경우보다 낮은 값을 가지게 된다.

3.4 측정 결과의 시뮬레이션 검증

측정된 함체의 품질계수에 대한 검증을 위해 수치해석 시뮬레이션이 수행되었다. 검증을 위해서 식 (13)이 식 (10)으로부터 도출되었다.

$$\sigma = \frac{8S^2 Q_{wall}^2}{9V^2 \omega \mu_0} \quad (13)$$

식 (13)은 임의의 함체의 품질계수가 입력되었을 때 함체가 입력된 품질계수를 갖도록 하는 함체 벽면의 등가 전기전도도를 구한다. 표 2의 1-포트 시간영역 품질계수 (1-port time domain quality factor)를 식 (13)에 대입하여 얻어진 값을 표 3의 등가전기전도도(equivalent electrical conductivity)로 표기하였다.

수치해석 시뮬레이션을 위한 모델링은 그림 6과 같다. 이 때 교반기는 제외하고 해석하여 실제 측정과 유사한 환경을 설정하였다. 그림 6의 함체의 벽면에는 표 3의 등가전기전도도(equivalent electrical conductivity)가 입력되

표 3. 품질계수에 의해 계산된 등가전기전도도
Table 3. Equivalent electrical conductivity calculated by quality factor.

Case	1-port time domain quality factor (7) [dB]	Equivalent electrical conductivity (13) [S/m ²]
Open	26.82	1,188
Mesh	32.24	14,388
Closed	32.51	16,286

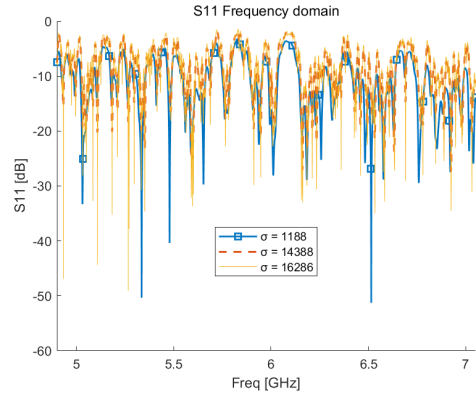


그림 12. 검증 시뮬레이션의 주파수 영역 산란계수 S_{11}
Fig. 12. Scattering parameter S_{11} of verification simulation in frequency domain.

었다. 나머지 설정은 3-2절의 경우와 동일하다. 시뮬레이션 결과, 주파수 축 산란계수가 그림 12와 같이 도출되었다. 시뮬레이션 결과에 대한 시간 축 산란계수(S_{11})는 그림 13에 표시했다. 그림 13은 측정된 시간 축 산란계수(S_{11})을 함께 표시하여 두 결과를 비교한다. 시뮬레이션된

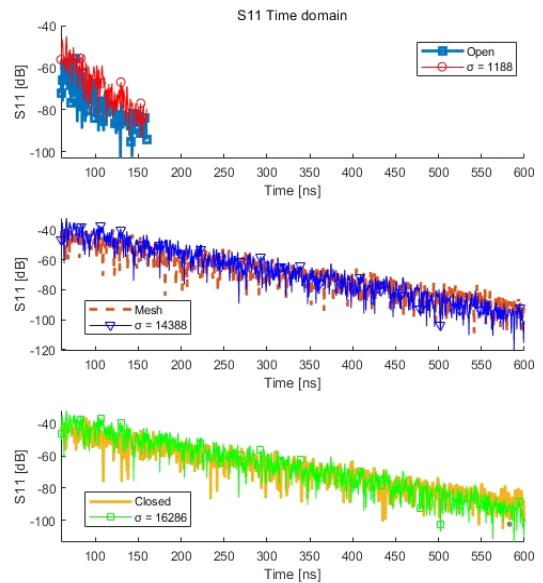


그림 13. 측정 결과와 검증 시뮬레이션 사이의 시간 영역 산란계수 S_{11} 비교
Fig. 13. Comparison between scattering parameter S_{11} of measurement and verification simulation in time domain.

산란계수(S_{11})와 측정된 산란계수(S_{11})의 비교 결과 일치하는 감쇠 경향을 확인할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 금속 메쉬 면을 포함하는 함체에 대한 품질계수 도출이 수행되었다. II 장에서는 금속 메쉬 면에 대한 등가 표면 임피던스 모델링이 소개되었고, 24 OPI의 사양을 가지는 알루미늄 메쉬를 대상으로 산란 특성이 해석되었다. 해당 메쉬 면의 경우 수직입사를 가정할 시 투과계수 -25 dB, 반사계수 -0.018 dB로 전자파 차폐에 유리한 특성을 가지는 것을 확인하였다. 또한 해당 메쉬 면은 실제 함체의 제작에 사용되었다. III 장에서는 제작된 함체의 성능 평가를 위해 활용성이 우수한 1-포트 시간영역 품질계수 도출 방법을 고려하였다. 해당 방법의 유효성은 수치해석 시뮬레이션을 통해 사전 검증되었다. 시뮬레이션 검증 결과 교반기가 없는 환경에서 함체 벽면의 전기전도도가 10 S/m^2 로 낮은 경우에는 32.7 %의 오차를 보이지만, 벽면의 전기전도도가 높은 나머지 경우에는 오차가 5.4 % 이하의 낮은 오차 값을 가짐을 확인하였다. 다음으로, 시뮬레이션 검증된 방법을 사용하여 실제 금속 메쉬 면이 포함된 함체의 품질계수 측정이 수행되었다. 품질계수 측정 결과, 메쉬 면이 포함된 함체의 품질계수는 모든 면이 금속으로 차폐된 함체에 준하는 높은 품질계수를 가지는 것을 확인하였다. 실제 측정 결과는 수치해석 시뮬레이션을 사용하여 최종적으로 검증되었다. 함체가 도출된 품질계수를 가지도록 하는 등가전기전도도가 계산되었고, 이를 함체의 매질 특성으로 입력한 환경에서의 시뮬레이션 결과를 측정 결과와 비교하였다. 비교 결과, 두 값의 감쇠 경향이 일치함을 확인하였다.

본 논문의 1-포트 시간영역 품질계수 도출 방법에 대한 검증 과정에서 수행된 시뮬레이션은 실제 측정 환경에 존재하는 함체 내의 케이블, 도장 처리된 안테나 표면, 온/습도 등에 따른 손실의 영향을 적용하기 어려운 한계가 있다. 따라서 향후에는 시뮬레이션 기반의 연구를 대신할 실제 동일 환경에서의 품질계수 도출 방법 간의 상호 비교 연구가 추가적으로 필요할 것으로 보인다.

References

- [1] D. V. Giri, R. Hoad, and F. Sabath, "Implications of high-power electromagnetic(HPM) environments on electronics," *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, vol. 9, no. 2, pp. 37-44, 2020.
- [2] B. J. Ahn, J. H. Park, K. J. Jung, M. N. Ju, and J. M. Woo, "Shielding effectiveness analysis for high power electromagnetic pulses according to the shielding mesh and grounding-system," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 32, no. 2, pp. 181-189, Feb. 2021.
- [3] M. Seo, S. Chi, Y. Kim, W. Park, H. Kang, and C. Huh, "Electromagnetic wave shielding effectiveness measurement method of EMP protection facility," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 25, no. 5, pp. 548-558, May 2014.
- [4] N. Amralah, "Shielding effectiveness of metal mesh and radio frequency shielding film for optical applications," in *2021 Antenna Measurement Techniques Association Symposium(AMTA)*, Daytona Beach, FL, Oct. 2021, pp. 1-5.
- [5] K. F. Casey, "Electromagnetic shielding behavior of wire-mesh screens," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 30, no. 3, pp. 298-306, Aug. 1988.
- [6] S. Y. Hyun, K. W. Lee, M. S. Kim, and J. G. Yook, "Electromagnetic modeling of shielding effectiveness of reinforced concrete walls," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 23, no. 3, pp. 384-391, Mar. 2012.
- [7] J. H. Kim, S. A. Lee, T. Y. Park, H. S. Choi, H. Kim, and B. G. Chae, et al., "Analysis of radio frequency(RF) characteristics and effectiveness according to the number of gores of mesh antenna," *Journal of Space Technology and Application*, vol. 1, no. 3, pp. 364-374, Nov. 2021.
- [8] D. A. Hill, M. T. Ma, A. R. Ondrejka, B. F. Riddle, M. L. Crawford, and R. T. Johnk, "Aperture excitation of electrically large, lossy cavities," *IEEE Transactions on*

- Electromagnetic Compatibility*, vol. 36, no. 3, pp. 169-178, Aug. 1994.
- [9] R. Armstrong, A. Marvin, and J. Dawson, "An experimental investigation of the use of Q-factor to determine the shielding effectiveness of electrically large equipment enclosures with apertures," in *Proceedings of the 10th International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, York, UK, Sep. 2011, pp. 148-152.
- [10] J. Yousaf, W. Nah, M. I. Hussein, J. G. Yang, A. Altaf, and M. Elahi, "Characterization of reverberation chamber: A comprehensive review," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 226591-226608, Dec. 2020.
- [11] Q. Xu, Y. Huang, X. Zhu, L. Xing, Z. Tian, and C. Song, "Shielding effectiveness measurement of an electrically large enclosure using one antenna," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 57, no. 6, pp. 1466-1471, Dec. 2015.
- [12] J. H. Hwang, H. H. Park, C. H. Hyung, and J. H. Kwon, "Quality factor and shielding effectiveness measurement of an antenna-free enclosure in a nested reverberation chamber," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 62, no. 6, pp. 2358-2367, Dec. 2020.
- [13] N. Nourshamsi, J. C. West, and C. F. Bunting, "Required bandwidth for time-domain measurement of the quality factor of reverberation chambers," in *2017 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility & Signal/Power Integrity(EMCSI)*, Washington, DC, Aug. 2017, pp. 481-485.
- [14] Copper Mountain Technologies, "Network analyzers using S2VNA software," 2023. Available: https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/ZVA_dat-sw_en_5213-5680-22_v1100.pdf
- [15] *Testing and Measurement Techniques - Reverberation Chamber Test Methods*, IEC 61000-4-21, Jul. 2011.

박 기 태 [한국항공대학교/박사과정]

<https://orcid.org/0009-0003-4548-8599>



2021년 2월: 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학사)

2022년 8월: 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학석사)

2022년 8월 ~ 현재: 한국항공대학교 항공전자공학과 박사과정

[주 관심분야] 마이크로파 및 밀리미터파, 전자파 측정 기술, 안테나 해석 및 설계, 수동 소자 해석 및 설계, EMI/EMC 대책 기술

황 대 영 [한국항공대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0009-0001-4680-7307>



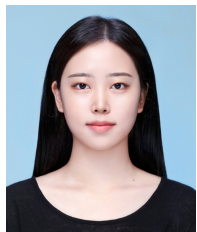
2021년 2월: 한국해양대학교 전파공학과 (공학사)

2023년 9월 ~ 현재: 한국항공대학교 항공전자정보공학과 석사과정

[주 관심분야] 마이크로파 및 밀리미터파, EMI/EMC 대책 기술, 전자장 수치해석

가 승 은 [한국항공대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0009-0001-7846-3721>



2019년 3월: 한국항공대학교 전자 및 항공
전자공학 (공학사)
2023년 3월 ~ 현재: 한국항공대학교 항공
전자정보공학과 석사과정
[주 관심분야] RF, 마이크로파 및 밀리미
터파, 안테나 해석 및 설계, 전자파 측
정 기술

이 재 욱 [한국항공대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0003-2903-5904>



1992년 2월: 한양대학교 전자공학과 (공학
사)
1994년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자
공학과 (공학석사)
1998년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자
공학과 (공학박사)
1998년 3월 ~ 2004년 2월: 한국전자통신
연구원 디지털방송연구단 전파기반연구그룹
2004년 3월 ~ 현재: 한국항공대학교 전기전자공학과 교수
[주 관심분야] RF, RF Power Amplifier, EMC 등 RF, RF Power
Amplifier, EMC 등 RF, RF Power Amplifier, EMC 등 RF, RF
Power Amplifier, EMC 등

한 정 훈 [한국항공대학교/조교수]

<https://orcid.org/0000-0002-3721-7700>



2009년 2월: 경북대학교 전기 및 전자공학
과 (공학사)
2011년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자
공학과 (공학석사)
2014년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자
공학과 (공학박사)
2014년 3월 ~ 2020 2월: 한국전자통신연

구원 산하 연구 기관

2021년 3월 ~ 2024년 2월 : 제주대학교 전파통신공학과 조교수
2024년 3월 ~ 현재 : 한국항공대학교 전기전자공학과 조교수
[주 관심분야] 안테나 시스템, 전자파 해석기법, 고출력 전자파,
전자파보안, 레이더 시스템 등