

공지통신 무전기 성능개량 간 안테나 추가에 따른 최적위치 설계 연구

A Study on Optimal Location Design Using Antenna Addition for Improving Air-to-Ground Communication Radios

안 승 범 · 최 명 석 · 이 성 일

Seungbeom Ahn · Myungsuk Choi · Sungil Lee

요 약

본 논문에서는 공지통신 무전기 성능개량을 위한 안테나 최적위치 도출 방법을 제안하였다. 공지통신 무전기의 RF 성능을 극대화시켜 원활한 무전기 교신을 수행하기 위해, 안테나 추가 장착에 대한 구조적 영향성과 케이블 하네스, RF 성능을 고려한 종합적이고 체계적인 안테나 최적위치 설계 과정을 도출하였다. 제안된 분석방법은 피아식별 장비 성능 개량 대상 항공기에 적용하여 피아식별 안테나와 GPS 안테나에 대한 최적 설계를 진행하였고, AIMS 플랫폼 인증과 개발시험 평가를 수행하였다. 안테나 최적위치 도출 방법은 비용을 줄이고 일정을 단축시키는 방법으로, 공지통신무전기 성능개량뿐 아니라, 모든 항전장비 개조사업에 적용할 수 있는 효과적인 방안이다.

Abstract

In this study, we propose an antenna optimal positioning method for improving air-to-ground communication radios. To maximize the RF performance of communication radios and perform effective communication, a comprehensive and systematic process is developed by considering the structural impact, cable harness, and RF performance of additional antenna installation. The proposed method is applied to aircraft subjected to IFF performance improvement to optimally design IFF and GPS antennas. In addition, AIMS platform certification and development test evaluation are performed. Designing optimal antenna location is an effective method that can be applied to improve the performance of air-to-ground communication radios as well as to avionics equipment remodeling projects by reducing schedule and cost.

Key words: Air-to-Ground Communication, Antenna Optimal Position, Interference Analysis

I. 서 론

항공기 전자장비의 비약적인 발전과 더불어 기존 군용 항공기의 통신 · 항법 장비 성능 향상을 위한 항공기 개

조 관련 소요는 지속적으로 증가하고 있다. 특히, 군 운용이라는 특수성으로 인하여 항공기 전자장비의 비화기능 강화 및 항재밍 성능 확보는 최대의 화두이다. 적과 아군을 구별하기 위한 identification friend or foe(IFF : 피아식

한화시스템 생산기술부(Production Technology Department, Hanwha System)

· Manuscript received October 14, 2021 ; Revised November 15, 2021 ; Accepted December 14, 2021. (ID No. 20211014-093)

· Corresponding Author: Seungbeom Ahn (e-mail: seungbeom.ahn@hanwha.com)

별 장비)의 Mode 4 운용 제한 해소와 한·미 연합 작전 수행 능력 향상을 위해 비화기능이 강화된 Mode 5로 교체하는 피아식별 장비 성능개량 사업과 재밍 위협의 증대에서 벗어나기 위한 항재밍 GPS(global positioning system: 위성항법 시스템) 체계 사업을 진행 중이다^[1]. 또한, 기존 아날로그 도약방식의 UHF(ultra high frequency: 극초단파) 무전기를 항재밍과 보안기능이 강화된 디지털 통신방식인 SATURN(Second Generation Anti-Jam Tactical UHF radio for NATO: 차세대 항재밍 전술 UHF 무전기) 무전기로 교체하는 공지통신 무전기 성능개량 사업을 준비 중에 있다^[2].

항공기 성능개량 간 전자장비의 원활한 송·수신을 위해서는 RF 신호 방사가 매우 중요하며, 항공기 구조 및 다른 RF 장비에 의한 영향성을 고려한 성능 분석이 필수적이다^{[3]~[5]}. 20~30년 전에 개발된 안테나의 성능 제한으로 RF 성능에 대한 국제 표준을 미충족하거나, 기존 안테나 운용이 제한되어 안테나 추가 장착 소요가 발생하는 경우에는 안테나 최적위치 선정이 매우 중요한 설계 요소가 된다. 항공기 외부에 장착되는 안테나의 구조 건전성과 공력 분석뿐 아니라, 기 장착된 안테나와 연동되는 통신·항법 장비 간의 간섭을 최소화하는 전반적인 설계를 진행하여야 한다^[6]. 특히, 설계 시점에 안테나 장착 위치에 따른 장비 간 간섭 영향성 분석은 방사패턴 분석과 함께 반드시 선행되어야 한다^[7]. 하지만 지금까지 항공기 성능개량 진행 시 항공기와 장비 원제작사의 정보제공이 제한되어 설계 시점에서 체계적인 분석을 통한 안테나 최적위치 도출은 제한되었으며, 항공기 개조 후에 성능을 확인하고 보완하는 과정을 반복함에 따라 많은 인력과 비용이 소요되었다.

본 논문에서는 공지통신 무전기 성능개량 시 안테나 추가 장착에 따른 최적위치 도출 분석 방법을 제안하고, 제안된 분석 기법을 이용하여 피아식별 장비 성능개량 대상인 공군 수송기 기종에 대하여 안테나의 최적 설계를 수행하였다. 안테나 간 최적위치 도출 방법은 사전준비 단계(preparation step)와 성능분석 단계(performance analysis step), 최종분석 단계(finalization analysis step)의 3 단계로 구성된다. 사전준비 단계는 항공기의 탑재된 장비와 안테나에 대한 조사를 바탕으로 간섭 분석이 필요한

장비를 선별하고, 안테나들에 대한 EM 모델링을 수행한다. 성능분석 단계 수행을 위해 추가 장착하고자 하는 안테나를 장착 가능한 영역에 위치시킨 후 방사패턴과 함께 기존 통신·항법 안테나와의 전달계수를 도출한다. 마지막 최종분석 단계는 항공기 탑재 장비의 특성과 도출된 전달계수를 바탕으로 최종 간섭 여부를 판단한다. 최종 간섭 여부를 확인하여 장비 간 간섭이 발생할 것으로 판단될 경우, 구조적으로 도출된 장착 가능한 위치로 변경 후 재수행을 통하여 구조적 측면과 RF 성능 측면을 모두 만족하는 안테나의 최적위치를 도출한다.

제안된 안테나 최적위치 도출 방법을 피아식별 장비 성능개량의 공군 수송기 기종에 대하여 적용하였다. 항공기 구조를 고려한 피아식별과 GPS 안테나 장착 가능 위치를 도출하고, 제안된 기법을 적용하여 피아식별과 GPS 안테나 추가에 따른 구조적인 문제가 발생하지 않으며, 장비 간 간섭도 발생하지 않는 안테나의 최적 장착 위치를 도출하였다. 설계과정에서 도출된 안테나의 최적위치를 기반으로 항공기 개조를 수행하여, 미 국방부 산하 기관인 DoD(Department Of Defense: 미국 국방부) AIMS(Air Traffic Control Radar Beacon System Identification Friend or Foe Mark XII/Mark XIIA System: 항공통제 및 피아식별 시스템)의 항공기 플랫폼 인증을 획득하였고 시험평가를 수행하였다^[8]. 제안된 안테나 최적위치 방법을 동일하게 적용하면 공지통신 무전기 성능개량 간에도 UHF 대역 안테나 추가 장착에 따라 발생할 수 있는 인력과 비용에 대한 손실을 최소화하여 안테나 추가 장착 설계를 진행할 수 있을 것으로 판단된다.

II. 안테나 추가장착에 따른 최적위치 도출 방법

레거시 항공기에 안테나를 추가로 장착하기 위해서는 구조 및 케이블 연동과 RF 성능 확보가 필수적이다. 안테나 장착에 따른 공력과 진동, 동적 분석 등의 구조 건전성 확인과 항공기 내부 RF 케이블 경로 최적화가 선행되어야 한다. 또한 RF 송·수신을 위한 방사패턴 성능 만족과 기장착된 안테나를 통한 장비 간 간섭이 발생하지 않는 최적의 위치에 안테나를 설계하여야 한다. 그림 1은 공군 수송기에 장착된 기존 안테나와 센서들로 RF 송·수신을

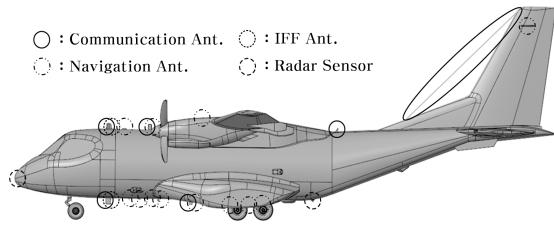


그림 1. 공군 수송기 기 장착 안테나 및 센서 위치
Fig. 1. Location of antenna and sensor mounted on air force transport aircraft.

위한 통신과 피아식별 안테나부터 수신 전용인 항법과 레이더 센서 등 총 20개의 안테나 및 센서가 탑재된다. 계통별 시스템과 안테나에 대한 목록은 표 1과 같으며, 통신·항법 계통의 4개 안테나가 통합형(VHF/L 대역 안테나, UHF/L 대역 안테나)임에 따라 총 24개의 독립적인 RF 선로가 존재한다. 수많은 기 장착 안테나의 체계 영향을 최소화하여 안테나를 추가하기 위한 설계는 매우 어려우며, 성능개량 사업의 효율적인 수행을 위해 체계적인 설계 방법이 필요하다. 다양한 통신·항법 시스템과 안테나를 고려하여 안테나의 최적위치 도출을 위한 설계 방법을 그림 2와 같이 제안하였다. 사전준비 단계는 기 장착된 시스템과 안테나에 대한 조사와 안테나 역설계로 구성된다. 항공기에 장착된 통신·항법 시스템과 안테나에 대한 상세 정보는 항공기 또는 장비 제작사가 가지고 있는 정보로 자료 확보가 제한된다. 따라서, 군용 항공기를 운용하는 부대의 지원을 통하여 운용자 교범과 정비 교범 등을 활용하여 자료를 확보하여야 한다. 시스템은

나, UHF/L 대역 안테나)임에 따라 총 24개의 독립적인 RF 선로가 존재한다. 수많은 기 장착 안테나의 체계 영향을 최소화하여 안테나를 추가하기 위한 설계는 매우 어려우며, 성능개량 사업의 효율적인 수행을 위해 체계적인 설계 방법이 필요하다. 다양한 통신·항법 시스템과 안테나를 고려하여 안테나의 최적위치 도출을 위한 설계 방법을 그림 2와 같이 제안하였다. 사전준비 단계는 기 장착된 시스템과 안테나에 대한 조사와 안테나 역설계로 구성된다. 항공기에 장착된 통신·항법 시스템과 안테나에 대한 상세 정보는 항공기 또는 장비 제작사가 가지고 있는 정보로 자료 확보가 제한된다. 따라서, 군용 항공기를 운용하는 부대의 지원을 통하여 운용자 교범과 정비 교범 등을 활용하여 자료를 확보하여야 한다. 시스템은

표 1. 공군 수송기 탑재 안테나와 센서 목록
Table 1. List of antenna and sensors for air force transport aircraft.

System	Equipment	Antenna/sensor	No.	Location	Note
Communication	HF radios	HF ant.	1	Whole tail	
	VHF radios	VHF ant.	2	Front upper Front lower	VHF/IFF integrated ant.
	UHF radios	UHF ant.	2	Front upper Center lower	UHF/TACAN integrated ant.
	ELT	VHF ant.	1	Rear upper	Only transmitter
IFF	Transponder	L-band ant.	2	Front upper Front lower	VHF/IFF integrated ant.
Navigation	VOR/ILS receiver	VOR/LOC ant.	1	Upper tail	
		Glide slope ant.	1	Front nosebay	
		Marker beacon ant.	2	Center lower	
	TCAS	Directional ant.	1	Front upper	
		Omni-directional ant.	1	Front lower	
	TACAN	L-band ant.	2	Front upper Center lower	UHF/TACAN integrated ant.
	DME	L-band ant.	1	Front lower	
	GPS	GPS ant.	1	Center upper	
Direction finding	RALT	RALT ant.	2	Front lower	Tran./Re. 1 set
	ADF	ADF ant.	1	Center lower	
Radar	DF	DF ant.	1	Center lower	
	RWR	CD band ant.	1	Rear lower	
	Weather	X band ant.	1	Front nosebay	

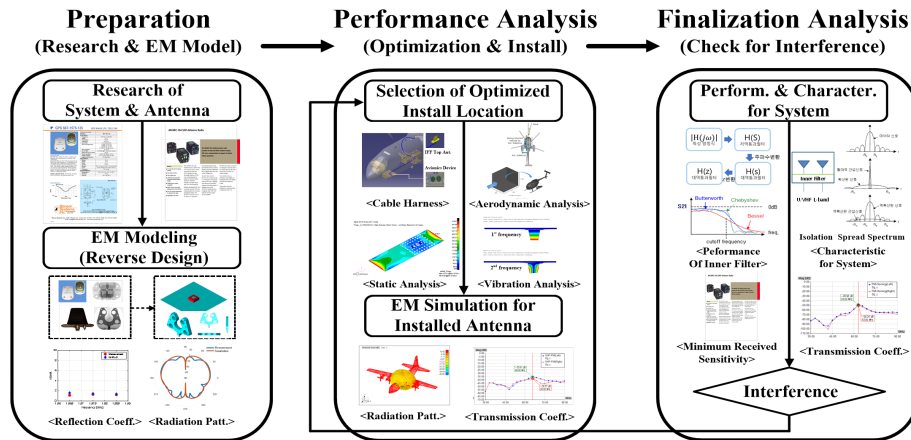


그림 2. 안테나 추가 장착에 따른 최적위치 설계 방법
Fig. 2. Method for optimal location design by the antenna addition.

해당 장비의 송신출력과 최저수신감도, 장비 내부의 필터 성능 등의 RF 성능과 관련된 정보가 필요하며, 안테나는 동작 주파수와 함께 주요 성능 요소인 반사계수와 방사 패턴 데이터가 필요하다. 안테나는 제조사의 공개된 규격 자료로 원하는 안테나의 상세성능 데이터를 확보하는 것이 제한되기 때문에 그림 3과 같이 안테나 역설계 방법을 제안하였다. 안테나 역설계 방법은 안테나의 규격 자료 조사와 안테나 성능 측정의 사전 준비단계, X-ray 투시를 통한 역설계 과정, 성능 비교를 통한 최종 분석 과정으로 나뉘진다. 안테나 성능은 공인된 안테나 측정 시설을 이용하여 운용 주파수에 대한 반사계수와 3차원 방사패턴을 측정한다. 다음으로 안테나 설계를 위해 X-ray 촬영을 통하여 안테나 급전부와 방사부에 대한 형상을 확인하고

이를 EM 시뮬레이션 툴을 이용하여 안테나를 디자인한다. 마지막으로 안테나 성능 측정 결과와 EM 시뮬레이션 결과를 비교하여 성능의 정확성을 확인하고, 안테나 형상을 조정하여 정확도를 높임으로써 안테나 최종 형상을 도출한다. 이 과정에서 안테나 형상이 100 % 일치하지 않더라도 측정 성능과 정합성을 높이는 것이 중요하며, X-ray 촬영을 통해서 안테나 재질 확인이 불가함에 따라 EM 시뮬레이션 과정에서 PEC(perfect electric conductor: 완전 도체)로 분석을 수행한다. 해당 과정을 통하여 반사계수와 3차원 방사패턴, 격리도 등의 안테나 성능 비교를 수행하여 기존 장착 안테나 또는 신규 장착 안테나의 EM 모델링을 진행할 수 있다.

안테나 단품에 대한 역설계가 완료되었으면, 항공기 탑재에 따른 구조 분석과 EM 성능을 분석하는 성능분석 단계를 수행한다. 안테나는 통신·항법 장비가 장착되는 항전배와 이격거리가 크기 때문에 케이블의 RF 손실을 최소화할 수 있는 케이블 하네스 설계가 진행되어야 한다. 특정 통신·항법 시스템의 경우는 국내·외 표준 또는 장비에서 요구하는 RF 손실 기준치를 충족하는 케이블 선택과 케이블 하네스 설계가 필요하다. 다음으로 안테나는 항공기의 외부에 장착되는 구조물로 구조적인 특성을 만족하는 위치에 대한 도출이 필요하다. 공력분석은 안테나가 미 장착되었을 때와 장착되었을 때의 공력 계수 변화 분석을 통하여 개조 영향을 판단하는 과정으로

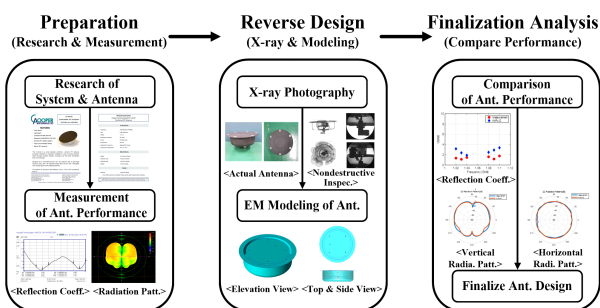


그림 3. 항공기 탑재 안테나 역설계 방법
Fig. 3. Method for reverse design of mounted antennas.

항력 계수와 방향 안정성 변화 등을 도출하여 분석한다. 구조 건전성 분석은 정적 분석과 동적 분석으로 진행되며, 정적 분석의 경우는 안테나 추가에 따른 인장 임계 하중과 관성 하중, handling 하중 등을 바탕으로 구조 건전성 평가 모델을 적용하여 도출한다^{[9][10]}. 동적 분석은 안테나의 진동 분석을 통하여 항공기가 가지고 있는 고유의 주파수를 회피하여 설계되었는지를 확인한다^[11]. 분석 결과, 구조 건전성 확보에 제한될 경우, 구조 보강을 통하여 외부 장착물을 탑재하는 데 제한이 없도록 설계를 진행한다. 상기 절차를 통하여 안테나가 장착 가능한 항공기의 영역이 도출되면 탑재하고자 하는 안테나의 역설계 모델링을 해당 위치에 탑재하여 안테나 방사패턴을 분석한다. 안테나의 방사패턴은 지향성과 무지향성의 안테나 특성과 함께 장비의 특성과 운용 요구도에 따라 방사패턴 요구도가 달라지며, 각 요구도에 따라 성능이 만족하는지를 확인한다. 마지막으로 타 장비와의 간섭 여부를 판단하기 위해 역설계된 기존 안테나를 항공기 장착 위치에 설계하여 전달계수에 해당하는 S -파라미터인 S_{21} 을 시뮬레이션을 통해 확인한다. RF 신호를 발생하는 항전 장비는 해당 장비의 주파수 대역의 RF 신호뿐만 아니라, 전체 대역에서 RF 신호를 생성하기 때문에 간섭 분석 대상 장비 각각의 동작 주파수에서 전달계수를 도출해야 한다.

항공기 구조 영향성과 RF 성능 분석이 완료된 후, 안테나 최적위치 도출 마지막 단계인 최종분석 단계를 수행한다. 안테나 추가에 따른 장비 간 간섭 분석 여부를 확인하는 최종단계로 탑재 장비의 특성과 분석된 전달계수를 이용하여 간섭 여부를 분석한다. 탑재 장비의 특성은 장비의 송신출력과 장비 내부의 필터 성능, 수신 대역의 최소 수신감도 등이 있으며, 장비 내부의 필터 성능은 일반적으로 공개되는 장비 성능이 아니기 때문에 필터 모델링을 통하여 분석할 수 있다. 탑재 장비의 특성뿐만 아니라, 적용 시스템 및 안테나의 특성도 확인 후 간섭분석 시 반영되어야 한다. 한 예로, GPS 시스템은 대역 확산 통신방

식으로 확산 이득을 보정해주는 과정이 포함되어야 하며, 통신 무전기 안테나와 L-대역 안테나는 통합형 안테나가 널리 사용되기 때문에 통합 안테나 분석 시에는 다이플렉서 또는 안테나 내·외부 필터에 의한 격리도를 반영하여야 한다^[12]. 항공기에 장착되는 시스템의 특성상 송신 시 고출력을 방사하며, 항전장비와 안테나가 운용 주파수 이외의 대역에서 완전한 RF 신호의 차단이 불가능하기 때문에 다른 항전장비에 영향을 줄 수 있게 된다. 또한, 항전장비의 수신감도는 매우 낮아 높은 에너지를 가지는 RF 신호가 방사될 때 안테나 특성에 의해 신호의 세기가 감쇠되어, 수신되더라도 수신장비가 신호를 인지할 수 있는 조건이 발생한다. 특히, 항공기의 경우, 탑재되는 안테나 간 물리적인 거리가 가깝고 항공기의 그라운드를 공유하기 때문에 이러한 현상이 더 쉽게 발생할 수 있다.

그림 4는 송·수신 장비 간 안테나 간섭 분석에 대한 개요도를 보여준다. 장비 내부에 송신신호를 발생하는 RF 모듈과 수신 RF 모듈이 각각 존재하며, 해당 주파수 이외에 신호를 감쇠시켜주는 내부 필터가 존재한다. 항전 장비의 RF 특성과 분석된 전달계수로 수신장비의 간섭에 의한 최종 수신전력을 식 (1)과 같이 도출한다. 간섭에 의한 수신장비의 최종 수신전력은 수신장비의 운용 대역과 송신장비의 운용 대역으로 나눠 계산하였다. 수신장비 운용 대역의 간섭은 송신장비 내부에서 발생한 RF 신호가 장비 내부 필터에 의해 감쇠 후 송신장비 안테나로 전달되어 RF 방사를 통하여 수신장비 수신 RF 모듈까지 전달

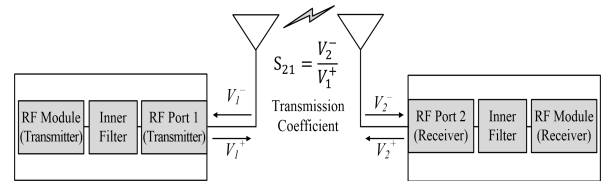


그림 4. 안테나 간섭 분석 개요도

Fig. 4. Schematic for interference analysis of antennas.

$$\begin{aligned}
 \text{Interference of the operat. band of the } R_x \text{ equip.: } R_x \text{ power} &= T_x \text{ power} - \text{Anten. of } T_x \text{ band filter} - S_{21}(R_x \text{ band}) \\
 &+ \\
 \text{Interference of the operat. band of the } T_x \text{ equip.: } R_x \text{ power} &= T_x \text{ power} - S_{21}(T_x \text{ band}) - \text{Anten. of } R_x \text{ band filter} \\
 &= \text{Final } R_x \text{ power of } R_x \text{ equip.} \begin{cases} \geq \text{Minimum sesitivity : Interference existence} \\ < \text{Minimum sesitivity : Interference none xistence} \end{cases} \quad (1)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 T_x \text{ power} - \{ \text{Anten. of } T_x \text{ band filter} + \text{GPS processing gain}(53.11 \text{ dB}) \} - S_{21}(R_x \text{ band}) \\
 = \text{GPS } R_x \text{ Power} \begin{cases} \geq \text{Minimum sensitivity : Interference existence} \\ < \text{Minimum sensitivity : Interference none existence} \end{cases} \quad (2)
 \end{aligned}$$

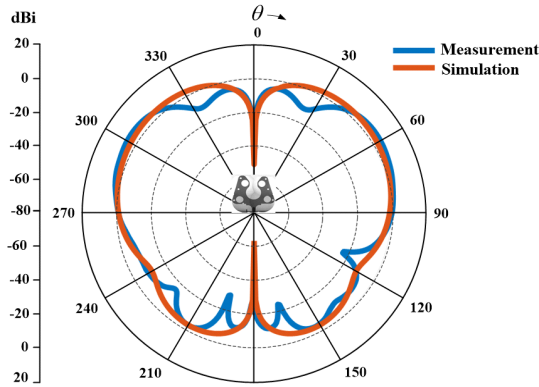
되며, 송신장비 운용 대역의 간섭은 송신장비에서는 해당 장비의 운용 대역으로 장비 내부 필터 감쇠 없이 송신장비 안테나로 전달되어 수신장비 안테나로 유입되며 수신장비 내부의 필터에 의해 RF 신호 감쇠 후 수신장비 수신 RF 모듈로 전달된다. GPS 시스템과 같이 수신전용 장비의 경우는 식 (2)와 같이 수신장비 대역 간섭만 고려하여 수신전력을 구하며, GPS 시스템은 RF 신호가 위성으로 송출될 때 스펙트럼 확산 변조 방식을 사용함에 따라 항공기에서 GPS 신호를 수신한 후, GPS 수신기에서 복원되는 과정을 통한 GPS 확산 이득(53.11 dB)을 반영하여 송신장비에 의한 GPS 수신전력을 계산한다^[12]. 송신장비 동작과 안테나 방사로 인한 수신장비 최종 수신전력이 장비의 최저 수신 감도 이상일 경우 간섭이 발생하게 되며, 최저 수신 감도 미만일 경우 송신장비에 의한 수신장비 간섭은 없는 것으로 판단된다. 최종 간섭 여부를 확인하여 장비 간 간섭이 발생할 것으로 판단될 경우, 구조적으로 도출된 안테나 장착 위치를 변경한 후, 성능분석 단계와 최종분석 단계에 대한 재수행을 통하여 장비 간 간섭이 발생하지 않는 최적의 위치를 도출한다.

III. 피아식별 장비 개조 간 적용사례

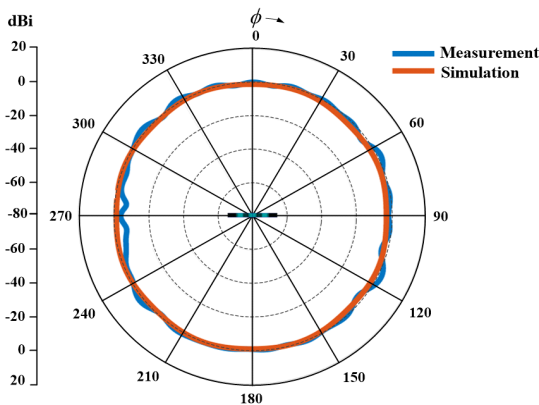
제안된 안테나 추가에 따른 최적위치 설계 방법을 피아식별 장비 성능개량 사업에 적용하였다. 피아식별 장비 성능개량은 적과 아군을 구별하기 위한 항전장비인 피아식별 장비의 Mode 4 운용 제한 해소와 한·미 연합 작전 수행 능력 향상을 위해 비화기능이 강화된 Mode 5로 전환하는 사업이다. 다른 성능개량 사업과 달리 암호 자재 연동을 위해서는 DoD AIMS 항공기 플랫폼 인증 획득이 필요하며 응답기를 장착하는 항공기 플랫폼은 지상시험 항목인 AIMS 1102와 비행시험 항목인 AIMS 1103 시험을 반드시 통과하여야 한다^{[13][14]}. 이 중 AIMS 1102 지상시험 항목에는 안테나 커버리지와 평균전력, 편파, 대역폭, VSWR 등의 안테나 전반에 관한 인증 요구도가 존재

하며, 국내 항공기 플랫폼의 경우는 안테나 커버리지 요구도와 안테나의 평균전력 요구도를 만족하지 못하여 IFF 안테나를 추가 장착하는 기종이 발생하였다. 또한, 피아식별 장비의 다른 성능인 ADS-B out 기능을 확보하기 위한 GPS 안테나를 추가하는 기종이 발생하였다. 이러한 안테나 추가 장착 요구도가 발생한 기종 중 항공기 상·하부에 IFF 안테나를 신규로 장착하고, GPS 안테나를 상부에 추가하는 공군 수송기 기종에 대하여, WILP-D라는 3D EM 시뮬레이션 툴로 본 논문에서 제시한 안테나 최적위치 도출 기법을 적용하여 분석하였다^[15].

공군 기종에 추가된 IFF 안테나는 L-대역에서 동작하는 RAMI사의 AT-741B/B 안테나로 편파와 대역폭, VSWR 등의 성능을 만족하며, AIMS 인증에 문제가 되었던 안테나의 평균전력도 100 W로 요구도를 만족하였다^[16]. 해당 안테나의 커버리지 방사패턴이 만족함을 확인하기 위하여 역설계 기법을 적용하여 안테나의 형상을 확인하였다. 그림 5는 공군 수송기에 추가 탑재된 L-대역 안테나의 1,030 MHz 방사패턴으로 논문에서 제안한 탑재 안테나 역설계 방법을 기반으로 도출한 결과이며, X-ray 촬영 결과 U자 형태의 4개 hole이 뚫려있는 모노폴 안테나 형상임을 확인하였다. 확인된 형상을 기반으로 1 m×1 m(약 3 λ×3 λ) 크기의 사각 그라운드 중심에 안테나를 위치시켜 안테나와 그라운드를 PEC로 설정하고 시뮬레이션하였다. 안테나 성능측정은 측정 시스템을 구축한 국내 안테나 전문업체의 전파 무반사실(5 m×3.5 m×7 m)에서 수행하였다. 고도각과 방위각에 대한 시뮬레이션과 측정결과가 매우 유사하고, 데이터 시트에서 언급한 이득인 0.5 dB 수준임을 확인할 수 있다. 공군 수송기에 장착이 가능한 IFF와 GPS 안테나 위치를 선정하기 위하여 성능분석 방법에 따라 케이블 하네스와 외부 장착에 따른 기체 구조 영향성을 분석하였으며, 항공기 개조를 위한 작업 편의성까지 고려하여 장착 가능위치를 도출하였다. 특히, 케이블 하네스의 경우는 AIMS 1102 지상시험 요구도인 RF 케이블 손실 3 dB 이내(안테나와 IFF 응답기 사



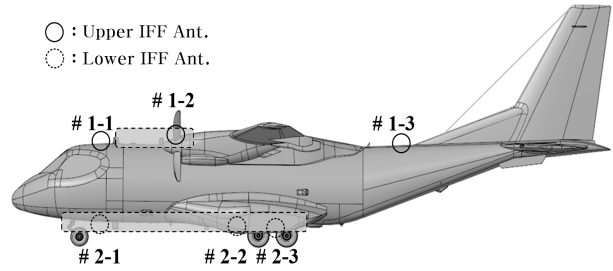
(a) 고도각 패턴(1,030 MHz)
(a) Elevation pattern at 1,030 MHz



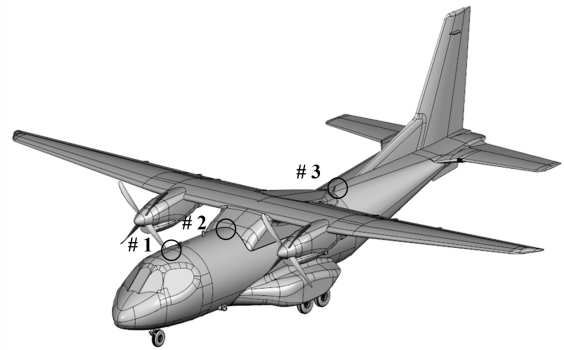
(b) 방위각 패턴(1,030 MHz)
(b) Azimuth pattern at 1,030 MHz

그림 5. 공군 수송기 탑재 IFF 안테나 역설계 결과
Fig. 5. Reverse design results of antenna mounted on transport aircraft.

이)를 만족하기 위하여 가능한 영역을 확인한 후에 구조 분석을 수행하였다. 그림 6(a)는 IFF 상·하부 안테나 장착이 가능한 위치와 RF 케이블 손실이 3 dB 이내일 것으로 판단되는 영역을 점선 형태로 보여주며, 상·하부 3개 지점 모두 분석결과, 구조 영향성이 없는 지역으로 확인된 영역을 나타낸다. IFF 상부 안테나 장착 가능 영역은 응답기가 동체 전방 항전베이에 장착되고, 항공기 외벽을 따라 케이블이 설치되어 하부 RF 케이블 대비 케이블 경로가 복잡하기 때문에 RF 손실 3 dB 이내인 구간이 하부 경로에 비해 상대적으로 짧은 결과를 보였다. 상부의 경우는 구조적 측면에서 장착 가능한 3개 지점 중에 케이블



(a) IFF 상·하부 안테나 장착 가능위치
(a) Installation locations of IFF lower/upper antennas



(b) GPS 안테나 장착 가능위치
(b) Installation locations of GPS antenna

그림 6. IFF 및 GPS 안테나 장착위치 분석
Fig. 6. Analysis of install location for IFF and GPS antennas.

손실 만족과 작업 편의성을 고려하여 #1-2 지점을 최종 후보 위치로 선정하였으며, 하부는 3개 지점 모두 케이블 손실은 만족하나, #2-1은 재킹 영역이고, #2-3은 유압라인과 타 장비 민감도를 고려하여 장착이 제한됨에 따라 최종 후보 위치를 #2-2로 결정하였다. 그림 6(b)는 GPS 안테나 장착 가능위치로, 보강 구조물 증가와 작업 편의성, 항공기 구조 등을 고려하여 #2로 최종 후보를 선정하였다.

후보 지역으로 선정된 지점에 대하여 안테나 방사패턴 분석을 통하여 성능 요구도 만족 여부를 분석하였다. 그림 7(a)는 IFF 안테나의 1,090 MHz 송신 방사패턴으로 AIMS 1102 지상시험 요구도인 커버리지 요구도가 만족함을 확인하였다. GPS 안테나의 경우, 보편적인 안테나 성능 기준인 3 dB 빔폭을 기준으로 성능을 분석하였으며, 그림 7(b)와 같이 항공기 상단 영역에 RF 신호를 차단하는 구조물이 없는 형태로 3 dB 빔폭이 60도 이상 확보됨에 따라 GPS 신호를 정상적으로 수신할 수 있음을 확인

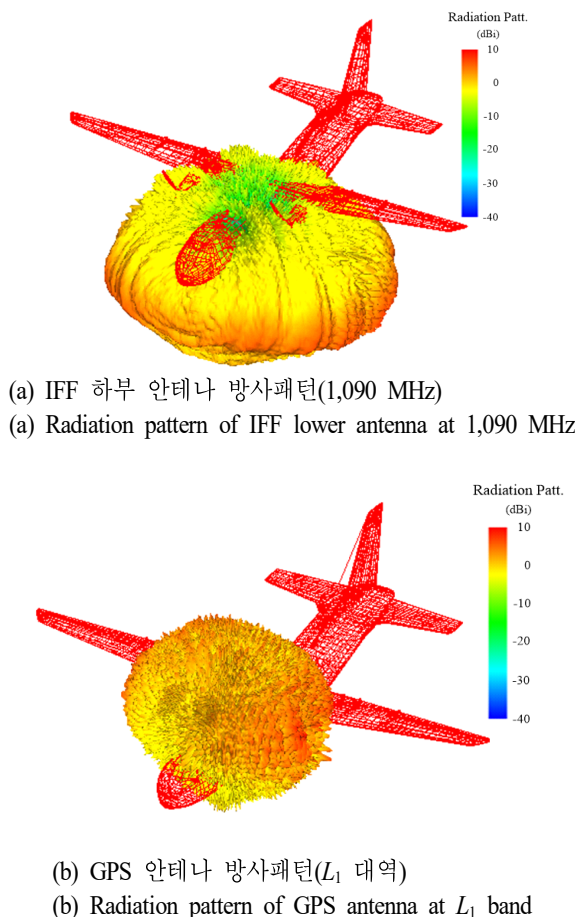


그림 7. IFF 및 GPS 안테나 방사패턴

Fig. 7. Radiation pattern of IFF and GPS antennas.

하였다.

IFF와 GPS 안테나의 방사패턴이 AIMS 인증 기준과 체계 요구도를 만족함에 따라 최종분석 단계인 안테나 추가에 따른 시스템 간 간섭 여부를 분석하였다. 탑재 장비 내부의 필터 성능은 가장 일반적이며, 모든 장비에서 최소한의 내부 필터 성능을 모사할 수 있는 5단 10차 Chebyshev 필터를 적용하여 모델링하였다^[3]. 표 2는 탑재 항전장비와 피아식별 장비의 내부필터 성능 예측치로 탑재 장비 및 피아식별 장비의 송신 주파수에서의 필터 성능값을 보여준다. TACAN과 DME, TCAS는 피아식별 장비와 유사 주파수 대역을 사용하는 장비로 운용 간 동시 송신 회피 및 수신 신호 오인을 방지하기 위한 억제기 설계가 구현됨에 따라 간섭 분석 대상에서 제외하였다^[17].

동일한 방법으로 GPS 장비의 수신필터 성능을 도출하였다. GPS 장비는 수신전용이며 상부에 탑재됨에 따라 상부에 장착된 안테나 시스템 주파수에 대한 GPS 내부 필터 성능만을 확인하였다. 식 (1)을 이용하여 최종 장비 간 간섭을 도출하는 과정을 수행하였으며, 계산된 공군 수송기 IFF 안테나 추가에 따른 장비 간 간섭분석 결과를 표 3에 예시로 나타내었다. 표 3(a)는 하부 IFF 안테나를 통해 1,090 MHz 신호가 송신하였을 때 타 장비로 수신되는 최종 수신전력을 계산한 결과로 응답기의 송신출력 57 dBm으로부터 수신장비의 1,090 MHz 대역 내부 필터 성능과 안테나 간 방사에 의해 시뮬레이션되어 전달계수로 도출되었다. 각각의 최종 수신전력은 식 (1)과 같이 수신 장비 운용대역 간섭과 송신장비 운용대역 간섭으로 분리하여 계산되었다. 억제기 설계에 의해 간섭 분석을 제외한 TACAN과 DME를 제외하고, 모든 장비에서 최종 수신전력이 개별 장비의 최저 수신감도보다 낮음을 확인하였다. 동일한 방법으로 표 3(b)와 같이 탑재장비 송신 시 하부 IFF 안테나를 통하여 전달되는 수신전력을 계산하였고, 모든 송신 장비에 의해 전달되는 최종 수신전력이 응답기의 최저 수신감도인 -88 dBm보다 낮음을 확인하였다. 표 4는 GPS 장비의 간섭분석 결과로 스펙트럼 확산 변조 방식에 의해 발생하는 GPS 확산이득까지 고려하여 분석함에 따라 탑재장비에서 전달되는 최종 수신전력은 -180 dBm 이하의 매우 낮은 값으로 TOD 수신을 위한 GPS 최저 수신감도인 -79.89 dBm보다 낮음을 확인하였다. 최종적으로 공군 수송기 IFF 상·하부 안테나와 GPS 안테나 추가에 따른 기존 탑재장비와 응답기 및 GPS 수신기 간 안테나 방사에 의한 RF 간섭이 발생하지 않음을 확인하였다.

안테나 추가 장착 확정안을 바탕으로 공군 수송기를 개조 완료하였으며, 응답기와 제어패널을 포함한 체계 개발사항에 대하여 AIMS 플랫폼 인증과 개발시험 평가를 수행하였다. AIMS 인증은 AIMS 1102 지상시험 과정에서 안테나 커버리지를 포함한 안테나 성능에 대한 자료 평가와 함께 방사시험을 통하여 정상동작 여부를 확인하였고, AIMS 1103 비행시험을 통하여 최대거리 비행시험과 안테나 패턴 시험으로 IFF 송·수신에 대한 RF 시험을 수행하였다. 또한, 개발시험평가 항목으로 안테나 추가에

표 2. 탑재 장비와 피아식별 장비 내부필터 성능 예측

Table 2. Prediction performance of inner filter for on-board and IFF equipments.

(a) 탑재장비의 IFF 송신대역 필터 성능(1,090 MHz)

(a) Filter performance for IFF transmitter band on-board equipment

Receiving equip.	ADF	HF radios	Marker beacon	VHF FM radios	VHF AM radios	UHF AM radios	TACAN, TICAS, DME	RALT
Receiving equip. freq. (MHz)	0.1~3	2~30	75	30~87.975	108~151.975	225~399.975	L-band (IFF similar band)	4,250~4,350
Filter value(dB)	-175.5	-128.2	-196.3	-157.5	-178.9	-191.7	N/A (suppression oper.)	-189.3

(b) 피아식별 장비의 탑재장비 송신대역 필터 성능

(b) Filter performance for on-board equipment transmitter band of IFF transponder

Transmitting equip.	HF radios	VHF FM radios	VHF AM radios	UHF AM radios	TACAN, TICAS, DME	RALT
Transmitting equip. freq. (MHz)	2~30	30~87.975	108~151.975	225~399.975	L-band (IFF similar band)	4,250~4,350
Filter value(dB)	-327.1	-267.6	-31.4	-276.8	N/A (Suppression oper.)	-256.4

따른 장비 간 정상동작 여부 확인을 위한 Intra-System EMC 시험을 진행하였고, 항목별 시험평가를 통하여 성능개량 후 항공기에 대한 기능 및 성능 평가를 수행하였다^{[18]~[20]}. 평가 결과, 피아식별 장비 성능개량에 따른 항전 시스템 체계에 영향 없음을 확인하였으며, 피아식별 장비 운용에도 제한사항이 없음을 따라, AIMS 플랫폼 인증과 시험평가를 효과적으로 마무리하였다. 제안된 안테나 최적위치 도출 방법은 항전장비 변경에 의한 성능개량 간에 안테나 추가 장착 현안 발생 시, 구조적인 영향성 검토와 함께 장비 간 RF 간섭 여부를 설계단계에서부터 검증할 수 있을 것이다. 항재밍 무선통신 기술 발달에 따라 연합군의 통신 보안기능을 향상시킬 공지통신 무전기 성능개량 사업에도 효과적인 설계 적용이 가능할 것이다. 구형 항공기에 장착된 70~80년대 개발된 UHF 대역의 안테나를 대체하여 우수한 성능을 가지는 안테나로 교체하거나 항공기 상·하부 중에서 한쪽에만 장착되어 있는 기종의 안테나 추가 장착 설계 소요가 발생할 것이다. 이에 안테나 추가 장착에 대한 구조와 전기, RF 전반에 대한 영향성 검토를 기반으로 최적위치를 도출하는 과정을 통해 개발 비용과 일정을 효율적으로 관리할 수 있는 최

적의 방법이 될 것이다.

IV. 결 론

본 논문에서는 안테나 추가 장착 요구도가 발생하는 항공기 성능개량 시 안테나의 최적위치 도출 방법을 제안하고, 피아식별 장비 성능개량 대상 항공기에 적용하여 안테나를 최적 설계하였다. 사전준비 단계와 성능분석 단계, 최종분석 단계의 3 단계로 구성되며, 구조적 영향성과 케이블 하네스, RF 성능 등을 포함한 종합적이고 체계적인 도출 방안을 제안하였다. 또한, 단계별 분석결과를 피드백 받아 안테나 역설계와 항공기 구조분석, 장비 간 간섭 분석을 재수행하는 방법으로 설계단계에서 효율적인 설계를 도출할 수 있도록 절차화하였다. 제안된 방법을 피아식별 장비 성능개량 사업의 대상 기종의 상·하부 피아식별 안테나와 GPS 안테나 설계에 적용하였으며, 항공기의 구조적인 문제가 없고, 장비간 RF 간섭이 발생하지 않은 최적위치를 도출하였다. 도출된 설계안을 바탕으로 항공기를 개조하여 AIMS 플랫폼 인증과 함께 개발시험 평가를 수행함으로써 피아식별 장비 성능 개량을 효과적으

표 3. 하부 IFF 안테나 추가에 따른 간섭분석 결과

Table 3. Interference analysis results by adding lower IFF antenna.

(a) 하부 IFF 안테나 응답기 송신-타 장비 수신 시 안테나 간 간섭분석

(a) Interference analysis between antennas in case of IFF transponder using lower antenna-other equipment reception

Receiving system	Transponder power output (dBm)	Interference classification	Filter value (dB)	Trans. coeff. (S_{21}) (dB)	Received power (dBm)	Final received power (dBm)	Min. received sensitivity (dBm)
ADF	57	ADF band	−397.0	−101.96	−441.96	−145.37	−67
		IFF band	−175.5	−26.87	−145.37		
Marker beacon		MB band	−257.1	−72.07	−272.17	−194.39	−61
		IFF band	−196.3	−55.09	−194.39		
VHF FM radios		VHF FM band	−267.6	−59.89	−270.49	−159.71	−110
		IFF band	−157.5	−59.21	−159.71		
VHF AM radios		VHF AM band	−231.4	−49.48	−223.88	−168.17	−98
		IFF band	−178.9	−46.27	−168.17		
UHF AM radios		UHF AM band	−276.8	−24.39	−244.19	−166.08	−99
		IFF band	−191.7	−31.38	−166.08		
TACAN, DME, TCAS-omni		TACAN, DME, TCAS band	N/A (IFF similar band: suppression operation)			N/A	TACAN, DME: −85 TCAS: −77
		IFF band					
RALT		RALT band	−256.4	−50.32	−249.72	−183.66	−85
		IFF band	−189.3	−51.36	−183.66		

(b) 타 장비-송신 하부 IFF 안테나 수신 안테나 간 간섭분석

(b) Interference analysis between antennas in case of other equipment transmission - IFF reception using lower antenna

Transmitting system	Equipment power output (dBm)	Interference classification	Filter value (dB)	Trans. coeff. (S_{21}) (dB)	Received power (dBm)	Final received power (dBm)	Min. receiver sensitivity (dBm)
VHF FM radios	42	IFF band	−157.5	−59.21	−174.71	−174.71	−88
		VHF FM band	−267.6	−59.89	−285.49		
VHF AM radios	40	IFF band	−178.9	−46.27	−185.17	−185.17	
		VHF AM band	−231.4	−49.59	−240.99		
UHF AM radios	40	IFF band	−191.7	−31.38	−183.08	−183.08	
		UHF AM band	−276.8	−24.39	−261.19		
TACAN, DME, TCAS-omni	TACAN: 60 DME: 54 TCAS: 57	IFF band	N/A (IFF similar band: suppression operation)			N/A	
		TACAN, DME, TCAS band					
RALT	24	IFF band	−189.3	−51.36	−216.66	−216.66	
		RALT band	−256.4	−50.32	−282.72		

표 4. GPS 안테나 추가에 따른 GPS 수신기 간섭분석 결과

Table 4. Interference analysis results of GPS receiver by adding GPS antenna.

Transmitting system	Equipment power output (dBm)	Filter value (dB)	GPS process gain (dB)	Trans. coeff. (S_{21}) (dB)	Final received power (dBm)	Min. receiver sensitivity (dBm)
HF radios	53	-155.2	53.11	-24.49	-179.80	-79.89
VHF FM radios	42	-186.2		-66.39	-263.70	
VHF AM radios	40	-201.9		-48.68	-263.69	
UHF AM radios	40	-135.7		-40.91	-189.72	
TACAN	60	-115.8		-40.91	-149.82	
TCAS	57	-150.3		-66.18	-212.59	
IFF	57	-150.3		-39.90	-186.31	

로 완료하였다. 제안된 안테나 최적위치 방법은 향후 추진될 공지통신 무전기 성능개량 사업뿐 아니라, 모든 항전장비 성능개량에 적용할 수 있는 설계 방안으로 성능개량 사업을 일정 내에 효과적으로 완료할 수 있는 최적의 방안이 될 것으로 사료된다.

References

- [1] Korea Defense Industry Association, "Hanwha Systems, signed contract to improve the performance of foe identification equipment(IFF) for aircraft: Expected to improve survivability and operational capability through effective combined military operation," *Defense & Technology*, vol. 487, pp. 16-17, Sep. 2019.
- [2] Defense Acquisition Program Administration, "Results of the 135th defense project promotion committee," 2021. Available: <https://www.korea.kr/news/pressReleaseView.do?newsId=156448767>
- [3] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 3rd ed. New York, NY, John Wiley & Sons, 2005.
- [4] J. Choi, J. Kim, "Analysis of optimum antenna placement considering interface between airborne antennas mounted on UAV," *Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers*, vol. 52, no. 6, pp. 32-40, Jun. 2015.
- [5] A. C. Polycarpou, C. A. Balanis, and A. Stefanov, "Helicopter rotor-blade modulation of antenna radiation characteristics," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 49, no. 5, pp. 688-696, May 2001.
- [6] M. Rothenhaeusler, W. Poisel, "Interference analysis process in military aircraft industry," in *2012 ESA Workshop on Aerospace EMC*, Venice, May 2012.
- [7] S. Ahn, J. Ji, H. Jung, and S. Lee, "A study on interference analysis by the addition of antenna for aircraft IFF modification" in *The Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science(KIEES) Summer Conference 2021*, Jeju, Aug. 2021, pp. 220-221.
- [8] Ministry of National Defense, "Department of defense, promoting improvement of acquisition procedures jointly with the defense acquisition program administration," 2020. Available: <https://www.korea.kr/news/pressReleaseView.do?newsId=156388580>
- [9] S. F. Hoerner, *Fluid Dynamic Drag: Theoretical, Experimental and Statistical Information*, Bakersfield, CA, Hoerner Fluid Dynamics, 1965.
- [10] *Airplane Strength and Rigidity Miscellaneous Loads*, MIL-A-8865B, Sep. 2021.
- [11] *Department of Defense Test Method Standard Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests*, MIL-STD-810H, Jan. 2019.
- [12] J. K. Holmes, *Spread Spectrum Systems for GNSS and Wireless Communications*, Boston, MA, Artech House, 2007.

- [13] *Technical Manual Performance Test Requirement MARK XIIA and Mode S & Mark XIIB Transponder Installation Test Requirements*, DoD AIMS 1102, Jul. 2018.
- [14] *Technical Manual Performance Test Requirement MARK XIIA and Mode S & Mark XIIB Transponder Operational Test Requirements*, DoD AIMS 1103, Jul. 2018.
- [15] WIPL-D, "Antenna Design," 2002. Available: <https://wipl-d.com/applications/antenna-design>
- [16] RAMI, "AT-741B/B product description." Available: <https://www.rami.com/wp-content/uploads/2021/04/AT-741BB-1.pdf>
- [17] *Technical Standard for the ATCRBS/IFF/MARK XIIA Electronic Identification System and Military Implementation of Mode S*, DoD AIMS 03-1000C, Apr. 2018.

- [18] H. C. Woo, Y. T. Kim, and B. G. Kim, "A research on the static discharger installation design and test for air vehicle," *Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, vol. 45, no. 7, pp. 574-580, Jul. 2017.
- [19] J. H. Kim, I. Jung, K. Lee, K. S. Lee, and S. Oh, "A study on electromagnetic environmental effects(E3) test and evaluation of a commercial derivative military aircraft," *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, vol. 22, no. 2, pp. 224-232, Apr. 2019.
- [20] J. W. Seo, B. K. Jung, C. B. Yoon, and Y. J. Shin, "The CE101 test of the army aircraft's UHF band transceiver," *The Journal of the Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 26, no. 11, pp. 992-998, Nov. 2015.

안 승 범 [한화시스템/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-8907-0261>



2004년 2월: 홍익대학교 전자전기공학부 (공학사)
 2006년 2월: 홍익대학교 전자공학부 (공학석사)
 2011년 2월: 홍익대학교 전자정보통신공학과 (공학박사)
 2011년 2월~2017년 4월: LS산전 책임연구

원

2017년 4월~2020년 5월: 한국항공우주산업 책임연구원
 2020년 5월~현재: 한화시스템 생산기술 2팀 수석연구원
 [주 관심분야] 구조체 안테나 해석 및 설계, 항공전자 RF/무전기 체계통합, 항공전자 시험평가

최 명 석 [한화시스템/수석연구원/팀장]

<https://orcid.org/0000-0001-5895-6812>



2002년 2월: 동아대학교 전기전자컴퓨터공학부 (공학사)
 2002년 2월~현재: 한화시스템 생산기획팀 수석연구원/팀장
 [주 관심분야] 항공전자 통신장비 개발 및 체계통합, 항공전자 시험평가

이 성 일 [한화시스템/수석연구원/파트장]

<https://orcid.org/0000-0001-9815-6860>



1999년 2월: 광운대학교 전자공학과 (공학사)
 1999년 3월~2001년 2월: (주) 화영 주임연구원
 2001년 6월~현재: 한화시스템 생산기술 2팀 수석연구원/파트장
 [주 관심분야] 항공기 통신장비 성능개량, 항공전자 체계설계 및 체계통합, 항공기 정보수집체계, 지대공 단/중거리 레이더