

요구성능 기반의 군용 항공기 항재밍 GPS 체계 구축 최적화 방안 연구

이문걸^{*,1)} · 신기수²⁾ · 최재식³⁾

¹⁾ 국방대학교 국방과학학과 군사운영분석전공

²⁾ 국방대학교 국방과학학과 무기체계전공

³⁾ 방위사업청 항공기사업부 탑재장비사업팀

A Study of Optimization Approach for GPS Anti-Jamming System's Integration on Military Aircraft Based on the Requirement of Capability

Moongul Lee^{*,1)} · Kisu Shin²⁾ · Jaesik Choi³⁾

¹⁾ Department of Military Operations Research, Korea National Defense University, Korea

²⁾ Department of Weapon Systems, Korea National Defense University, Korea

³⁾ Avionics Project Team, Defense Aquisition Program Administration, Korea

(Received 4 July 2014 / Revised 5 November 2014 / Accepted 9 January 2015)

ABSTRACT

Global Positioning System(hereafter; GPS) is recently an essential element in the various navigation and weapon delivery systems of military aircraft. However, GPS is vulnerable to the jamming threats since its signal power is very weak. Therefore, ROK defense has been concerning how to resolve this issue and how to integrate these systems needed, and is trying to acquire the proper anti-jamming GPS system. This study is to provide several schemes against the jamming threats effectively.

We propose the several processes to analyze the required capability and demonstrate the result's of modeling and simulations(hereafter; M&S) for this integration of military aircraft, and the mathematical programming model for system optimization of military aircraft anti-jamming GPS system on the basis analysis of M&S results which could be considered available budget and the project characteristic. These schemes will be helpful on proper acquisition of these systems and. We are looking forward to contributing to the integration of anti-jamming GPS system of ROK military aircraft.

Key Words : GPS(위성항법체계), Anti-Jamming System(항재밍체계), Signal Mitigation Technique(신호축소기법), Modeling and Simulation(모델링&시뮬레이션), Optimization Method(최적화기법)

* Corresponding author, E-mail: mglee@kndu.ac.kr

Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

현대전에 있어서 전투기 및 각종 무기체계의 항법은 필수적인 요소로서 항공기가 올바른 목적지로 이동하고 유도무기의 경우는 원하는 표적을 정확히 명중하도록 안내할 수 있는 기능이 요구된다. 이를 위한 핵심시스템으로서 과거부터 관성항법 장치가 운용되어 왔고 1980년 후반부터는 위성항법시스템이 개발되어 군사 분야뿐만 아니라 민간분야까지도 널리 사용되고 있다. 이러한 시스템은 항법체계의 정확성과 확장성을 증가시켜 주고 있어 무기체계의 새로운 이정표가 되고 있다. 최근에 와서는 보다 정밀도를 향상시키기 위해 위성항법과 관성항법이 통합된 체계로 변화하고 있다. 또한 항공탄약에 적용된 GPS 유도탄은 원거리(Stand-off Attack) 정밀공격뿐만 아니라 전천후 공격이 가능하여 항공기(전투기)의 생존성을 획기적으로 증가시켜 주고 있다. 또한 항공무기체계뿐만 아니라 해상 및 지상 무기체계 역시 GPS의 중요성이 급격히 증가하고 있고 혁신적인 전쟁수행 가능하게 하고 있다.

그러나 GPS는 약 20,000km 상공의 GNSS(Global Navigation Satellite System)로부터 받는 신호전력이 매우 약해 재밍 위협에 매우 취약하다. 그리고 북한 또한 GPS 무기체계에 대응하기 위해 비대칭 전력으로 관련 재머를 생산하고 2000년대 이후 수차례 재밍을 시도하여 우리 군의 GPS 관련 무기체계에 장애를 발생시킨 사례가 관측되고 있으며, 향후에도 이와 같은 위협상황은 지속될 것으로 판단된다^{3,4)}.

이에 따라 우리 군은 GPS 재밍 위협에 대응할 수 있는 방책이 요구된다. 하지만 우리 군의 대부분의 무기체계는 이러한 GPS 재밍 위협에 대해 노출되어 있는 것이 현실이다. 따라서 이를 해소하기 위한 대책으로 항재밍 GPS 체계 도입이 추진되고 있다.

이러한 GPS 무기체계의 중요성 인식과 우리 군용기를 적성국의 재밍 위협의 증대 상황에서 해방시킬 수 있는 대책 마련이 절실하게 되었다. 이에 따라 항공기 항재밍 GPS 체계 구축사업의 효율적 추진 방안에 대한 연구가 필요하다. 이를 위해 먼저 군용항공기의 항법관련 시스템의 구성을 분석하고 구현 가능한 솔루션을 도출하여야 한다. 하지만 국내에서는 항재밍 GPS 체계의 복잡성과 요구성능에 따른 개조범위 및 비용 격차가 크기 때문에 이러한 요소들을 종합적으로 고려

하는 방법론 적용은 국내는 거의 전무하다.

따라서 본 연구에서는 최적화된 항재밍 GPS 체계 구축에 요구되는 프로세스 제시를 위한 정량적 기법과 체계 조합 최적화 모형을 제안한다. 먼저, 요구성능 도출을 위해 재밍의 대응 수준과 관련된 공학적 수식에 의해 멀티 플랫폼 별 작전요구성능(ROC : Requirement of Capability) 설정하고, 각 성능을 충족할 수 있는 솔루션들과 비용의 제약 하에 최적 조합 선택이 가능한 수리 모형을 구축하고 결과를 분석한다.

1.2 연구범위 및 방법

본 연구에서는 최적화된 항재밍 GPS 체계 구축에 요구되는 프로세스를 제시하고 수리모형을 이용하여 항재밍 GPS 체계 구축 최적화를 연구하였으며, 연구범위 및 가정사항은 아래와 같다. 연구목적 상 항재밍 GPS 체계 구축은 군용 항공기를 대상 플랫폼으로 하며, P(Y)코드를 운용하는 군용 GPS수신기 기반으로 한정한다.

기종별 요구성능은 적 GPS 재머 위협 및 실제 작전 개념에 기반하여 분석해야 하나 군사정보 활용 제한으로 본 연구에서는 연구자가 설정한 임의의 수치를 활용한다. 가정된 수치를 이용한 수리 모형 분석 결과는 최적의 조합 선택에 대한 결과를 제시한다.

연구방법으로 먼저 구축해야 할 항공기별 항재밍 GPS 체계를 분석하기 위해 작전운용개념에 따른 ① 요구성능 도출 프로세스를 설정한다. 그 다음, ② 기종별 요구성능을 분석하며, 이때 적용되는 수식은 항재밍 성능을 산출하는 일반적 공학 공식이다. 다음으로 도출된 요구성능을 충족할 수 있는 ③ 최적화 수리모형 구성을 통해 각각의 소요 비용에 따른 최적 솔루션을 도출하고 최종적으로 ④ 최적의 복합적 체계 조합 선택 방안을 제시하도록 한다.

2. 항재밍 GPS 체계 이론 고찰

2.1 GPS 일반

2.1.1 GPS 개요

GPS(Global Position System)은 미국이 1973년부터 국방성에 의해 미사일 등의 무기를 이용한 원거리 공격을 할 때 항법의 정확성과 명중률을 높이기 위하여 개발된 위성기반의 항법체계를 말한다. GPS는 4개 이상의 위성으로부터 방해받지 않는 가시거리에서 신호를

받을 경우 전천후 조건에서 시간과 위치정보를 제공한다. 미 국방성에서 위성 24개를 띄워 완전한 GPS체계가 작동하게 된 것은 1994년부터이다^[3].

GPS체계의 기본 운용개념은 Fig. 1와 같이 첫째, GPS수신기 지구 상공의 GPS 위성에서 보내지는 정확한 시간과 송신 메시지를 이용하여 수신기의 위치를 계산하고 둘째로, 수신기는 보내온 메시지의 정보를 이용하여 각 메시지의 (도착)경과시간을 산출하여 빛의 속도를 사용하여 각 위성까지의 거리를 계산한다. 마지막으로, 이 거리와 위성 위치를 토대로 항법공식에 의해 수신기의 위치가 산출된다.

GPS 시스템은 위성부분(SS : Space Segment), 지상국부분(CS : Control Segment), 사용자부분(US : User Segment)으로 구성된다. 다음의 Fig. 2에서 보는 것과 같이 위성부분은 31개의 위성이 작전운용 가능한 상태이며, GPS 위성은 약 20,200km 상공의 궤도를 돌고 있

고, 한번 궤도를 완주하는 데는 11시간 58분이 소요된다. 위성 4개씩이 6개의 궤도면(orbital plane)을 갖고 궤도를 돌고 있으며 24개 외에 7개의 추가적인 위성은 위성의 고장에 대비할 수 있을 뿐만 아니라 수신기가 더 많은 위성을 잡을 수 있어 수신기의 정확도를 높여 주고 있다. 위성에서 보내오는 신호의 주파수는 L-band(L1 = 1,575.42MHz, L2 = 1,227.60MHz) 반송파(Carrier Wave)를 이용하며 이동통신에서 코드를 이용한 동일한 주파수 대역에 다수의 사용자가 서비스에 접속할 수 있는 기술인 CDMA(Code Division Multiple Access)방식을 적용하고 있다.

지상국부분은 미국 콜로라도 주의 스프링스에 위치한 주관제센터(MCS : Master Control Station), 부관제센터, 4개의 지상 안테나(GA : Ground Antenna), 그리고 6개의 위성감시소(MS : Monitoring Station)로 구성되어 있다. 주관제센터는 6개의 위성감시소로부터 자료를

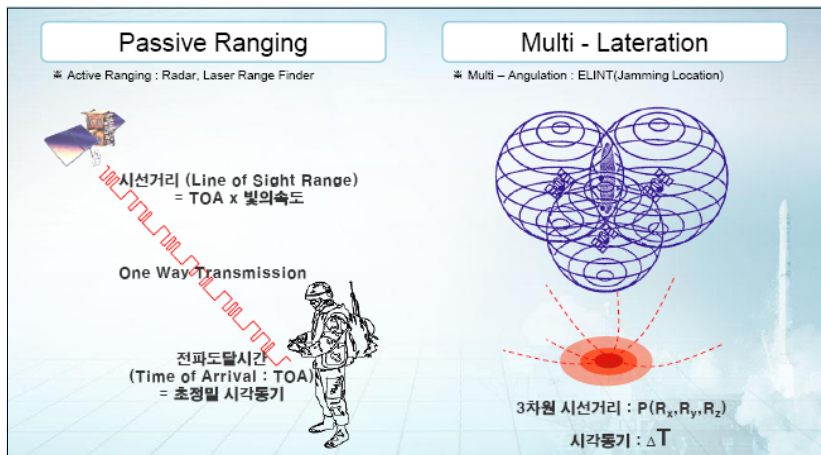


Fig. 1. Concept of acquisition of GPS signal(Ref^[3] : K. W. Song,)



Fig. 2. Basic GPS system

받아 위성이 제 궤도를 유지하는데 필요한 모든 처리와 항법메시지를 만들어 내는데 이런 자료는 지상안테나를 통하여 위성으로 보내진다. 그러나 주관제센터, 위성감시소 및 지상안테나의 자료 송신을 위한 통신은 GPS위성이 아니라 통신위성을 주로 사용한다.

사용자부분은 GPS수신기를 말하며 GPS 위성에서 송신하는 주파수에 동조된 안테나, 수정발진기등을 이용한 정밀한 시계, 수신된 신호를 처리하고 수신기 위치의 좌표와 속도 벡터 등을 계산하는 처리장치, 계산된 결과를 출력하는 출력장치로 구성되어있다. GPS 수신기는 P(Y) 코드를 사용하는 군용수신기와 C/A 코드를 사용하는 일반 상용 수신기가 있다. 사용되는 코드는 상용(L1-C/A와 L2-CS 민간코드)과 군용(L1, L2의 P(Y)코드)으로 구분할 수 있다.

Table 1은 GPS신호 규격 및 특성을 정리한 것이며 상용코드인 C/A 및 CS에 대한 신호정보는 GPS ICD-200C를 통해 일반에 공개되어 있다. 반면에 군용인 P(Y) 코드는 정보가 비공개되어 있을 뿐만 아니라 암호화되어 있어 일반인의 접근이 어렵게 되어있다. 주파수 대역의 경우 상용은 2.046MHz의 폭을 갖고 있고, 군용은 20.046MHz의 폭을 갖고 있다. 따라서 잡음 재밍 시 주파수 폭이 넓은 P(Y) 코드는 상용보다 항재밍 성능이 높다. 이와 같은 신호 특성의 차이로 인해 상용 수신 항재밍 능력은 30dB인 반면에 군용 수신항재밍 능력은 40dB로 약 10배의 성능차이를 가지게 된다.

다. 여기서 dB(Decibel)는 Power의 비를 나타내는 대수단위로 $L_{dB} = 10 \log_{10} (P_1/P_0)$ 식을 사용하여 2배이면 약 3dB, 10배면 10dB, 100배면 20dB 차이가 난다.

2.1.2 GPS 취약점 및 개선사항

GPS의 정확도는 상용인 C/A코드 수신기가 약 10m(95%)의 오차를 가지며 군용인 P(Y) 코드 수신기는 약 6m(95%) 오차를 갖고 있어 지금까지 나와 있는 어느 항법장비보다도 정확도가 높다. GPS의 활용 분야는 매우 폭이 넓다. 일반인이 사용하는 분야는 항법, 지도제작, 자동차 및 사람 추적, GPS의 위치와 시간 정보를 이용한 재난 또는 비상 상황에서의 서비스, GPS 센서를 장착하여 자동항법을 하는 로봇틱스 등 광범위하게 활용되고 있다. 이는 20세기에 발달한 과학기술 가운데 가장 혁신적이며 유용한 기술로 인정되고 있다.

GPS는 초기부터 군사적으로 적의 표적을 원거리 공격을 할 때 항법의 정확성과 명중률을 높이기 위하여 개발되었다. 군사적 활용은 일반용과 마찬가지로 항공기, 군함, 군용차량, 병사들의 독도법 등의 항법에 가장 많이 이용되고 있다. 또한 GPS 유도탄, 순항미사일 등의 표적 추적에 활용되고 있으며, 이는 무기의 CEP(Circular Error Probable; 원형공산오차)를 줄이고, 항법의 정확도를 증가시킬 뿐 아니라 전천후 원거리(Stand-off Attack) 공격을 가능하게 하고 있어 전투기의 생존성을 크게 증가시켜 준다. 이 밖에도 군사적으

Table 1. GPS signal specification and characteristics

구 분		상용 L1-C/A 및 L2-CS	군용 L1 및 L2
메시지	레이트	L1 : 50bps, L2 : 25bps	L1 : 50bps, L2 : 50bps
	정보	시각/궤도/이온층 정보 (GPS ICD-200C 공개)	시각/궤도/이온층 정보 (군전용 WAGE 정보 일부 비공개)
코드변조	레이트	1.023MHz	10.23MHz
	코드종류	CDMA(GPS ICD-200D 공개)	CDMA(Y 암호코드 비공개)
반송파(중심주파수)		L1 : 1575.42MHz L2 : 1227.60MHz	L1 : 1575.42MHz L2 : 1227.60MHz
주파수 대역(폭)		L1, L2 : 2.046MHz	L1, L2 : 20.46MHz
수신 전력		L1 : -158.5dBW L2 : -164.6dBW	L1 : -161.5dBW L2 : -164.5dBW
수신 항재밍(J/S)		30dB	40dB

로 탐색구조 및 정찰 등의 임무에도 활용되고 있다.

전 세계적으로 무기체계(플랫폼, 탄약 등)의 GPS 의존도가 매우 증가 추세에 있으며, 이는 GPS로 인하여 효율적인 전장수행과 네트워크중심전(NCW : Network Centered Warfare)이 가능하기 때문이다. 이러한 군사적 유용성 때문에 적대국 간에 GPS의 사용을 방해하려는 항법전(Navigation Warfare)이 일어나고 있다.

GPS가 매우 유용한 반면, 취약성도 동시에 갖고 있는데 주로 오차 발생과 관련된 것이다. 우선 위성장비 자체에 위성시계의 오차 및 수치오차 등이 존재한다. 자연적 간섭에 의한 오차 및 부작용으로는 첫째, 지상의 수신기에 도달하는 GPS 신호는 상대적으로 약하기 때문에 다른 발생원으로부터 생기는 전자파 때문에 감도가 더욱 약해져, GPS 신호를 얻고 추적하는 것이 어렵거나 불가능해 질 수 있는 것이며 둘째로 전리층의 영향, 천체력, 대류권, 태양 대기에서 발생하는 수소폭탄 수 천만 개에 해당하는 격렬한 폭발로 인한 태양플레어, 지구 자기권의 일시적인 혼란 현상인 지자기 폭풍 등의 요소들로 인해 GPS 수신을 저해하고 간섭을 일으켜 오차가 발생할 수 있다⁹⁾.

가장 큰 제한점은 약 20,000km의 고도에서 송신하여 수신되는 신호, 즉 휴대폰 신호의 1/100(= -160dBW = 10⁻¹⁶Watt) 세기로 매우 약하여 인위적인 전파방해에 매우 취약하다는 것이다. 또한 C/A코드를 사용하는 민간주파수의 경우 신호체계가 공개되어 재밍에 쉽게 노출될 수 있고, 시중에서도 이 같은 재머를 쉽게 구입할 수 있다. 특히 암호화가 되어있고 주파수 폭이 20Mhz로 넓은 P(Y)코드를 사용하는 군용 GPS에 비하여 상용 GPS는 주파수 대역 폭이 2Mhz로 좁고 암호화가 안되어 있다¹⁰⁾.

2.1.3 GPS 항법전 대응체계

GPS항법전 위협은 적대적 GPS교란 및 GPS사용, 비군사작전 사용제한으로 구분된다. 적대적 GPS교란은 재밍 위협이 대표적이며 기본적으로 수신전력이 약해 전자파 간섭에 취약하며, 상용 코드의 경우 신호체계의 공개로 허위/조작에 의한 기만에 노출되어 있다는 단점을 이용해 적대적 의도로 GPS신호를 교란하는 것이다.

적대적 GPS사용은 적대국이 이미 전 세계에 공개된 GPS 상호신호체계 ICD(Interface Control Document)를 활용하여 군사적으로 이용하는 것이다. 예를 들어 스커드 및 노동 1호 미사일 등 적 지대지 미사일이 GPS를 통해 위치를 보정할 경우 그 정확도가 최고 180배까지 향상될 수 있다는 연구 결과가 있다¹¹⁾.

비군사 작전 사용제한은 군사작전시 사용제한을 할 경우 후방지역 평화적 사용도 제한될 수 있는 위협이다. GPS는 군사적 목적으로 개발, 구축되었으나 현재 민간점용으로 운영되고 있다. 또한 군용 및 상용 신호체계가 혼용되고 있고, 군사작전지역 및 평화지역도 지역적으로 구분되지 않는 상황이기 때문에 현재의 GPS체계는 이에 대한 대응이 어렵다.

미국은 이러한 위협에 대비한 기본정책 방향(PDD NSTC-6)을 명시하였다. 첫째로 적대적 GPS교란에 대해서는 GPS현대화 계획에 따라 군전용 M 코드 신호체계와 중계신호 증강, 그리고 항재밍 GPS 체계 및 대응전술 개발로 대처하는 보호(Protect) 개념을 제시하였다. 둘째로 적대적 GPS사용은 M 코드 운용 시 전파집속(Spot Beam)을 활용해 C/A 코드 잡음레벨을 상승시키고 P(Y)/M 코드에 대한 인증체계 강화 및 지역 구분 운용으로 방해(Prevent) 개념을 적용한다. 셋째로 GPS

Table 2. Construction of GNSS(2014)

운용국	시스템명	구축방식	운용레도	위성군	현황
러시아	GLONASS	지구전역 체계	중궤도	24	24기 운용
유럽연합	GALILEO	지구전역 체계	중궤도	30	6기 시험운용 구축중
중국	BEIDOU- I	지역(아시아) 체계	정지궤도	4	1기 운용
	BEIDOU- II	지구전역 체계	중궤도	30	16기 운용
일본	QZSS	GPS 연동체계(일본)	준천정궤도	3	1기 시험운용 구축중
	JRANS	지역(동북아)체계	정지 궤도	4	
인도	IRNSS	지역(중양아)체계	정지궤도	7	6기 시험운용 구축중

비군사적 사용에 대해서는 보존 정책으로 3세대 L5 민간전용 신호체계를 운용하고자 한다^[1].

현재 3종류의 GPS항법전 대응방안을 모두 수행하기 위해서는 독자적인 항법위성체계 구축이 필수적이다. 따라서 Table 2와 같이 러시아 GLONASS, 중국 BEIDOU, 유럽 GALLILEO 등 세계 각국은 GPS항법전 대응을 위해 위성항법체계를 구중중이나 이들 중 정상적으로 운영하는 체계는 미국 GPS가 유일하다고 볼 수 있다.

우리나라의 경우에도 GPS항법전 위협에 대응하기 위해서는 자체 위성항법체계 구축이 필수적이거나 자국 GPS위성 및 지상통제소 구축시 고비용 및 장기간이 소요되기 때문에 현 위협에 즉각적이고 현실적으로 대응하기 위한 방안으로는 부적절하다. 또한 북한 GPS위협은 주로 적대적 GPS교란인 재밍 위협에 편중되어 있어 상대적으로 구현이 용이한 항공기 항재밍 GPS 체계를 구축한다면 효율적으로 북한 GPS재밍 위협에 대응할 수 있는 보호능력을 확보할 수 있다. 따라서 우리군의 GPS 항법전 대응책은 항재밍 GPS 체계 구축방안으로 추진해야 할 것이다.

2.2 항재밍 GPS 체계 일반

2.2.1 GPS 재밍 기법

GPS재밍은 Table 3과 같이 크게 잡음재밍과 기만재밍으로 구분된다. 기만재밍은 다시 재방송 재밍인 미코닝(Meaconing)과 허위신호 송출 재밍인 스푸핑(Spoofing)으로 나뉜다.

잡음재밍은 동일 주파수 대역의 GPS 신호보다 강한 신호를 방사하여 정상적으로 GPS 신호를 수신할 수 없도록 하는 기법이다. GPS 신호가 매우 약하기 때문에 가장 쉽게 교란이 가능한 기법이며, 항재밍 안테나를 통해 대응하는 방안이 대표적이다^[5].

미코닝은 GPS신호를 수신, 재방송함으로써 항법위

치 분석에 혼란을 주는 재밍이다. 즉 교란지역에서 GPS 신호를 수신하여 이를 지연시킨 후 다시 교란대상 수신기를 이용 신호를 재발신하여 지연에 의한 비정상 항법오차가 발생되도록 하는 기법이다. 이러한 신호지연을 위해 고속 DRFM(Digital Radio Frequency Memory)을 사용하고 위상 동기 입력 및 독립적으로 진폭이나 위상을 조절할 수 있다.

스푸핑은 GPS 신호와 유사한 허위신호를 송출하여 대상체계 유입하는 개념으로 동일 주파수 및 코드로 된 모의 GPS 신호를 허위로 송신하여 GPS수신기가 잘못된 정보를 획득하게 하거나, 프로세서를 오류를 발생시키는 기법이다. 일반 GPS수신기에서 이러한 교란신호를 탐지하기 어려운 특징이 있다. 상용 GPS의 경우에는 주파수 및 코드 그리고 신호 구조가 노출되어 있어 교란이 가능할 것으로 판단되나 시간동기화 및 모의 신호 발생 등 고난이도 기술이 필요한 기법이며, 암호화된 P(Y) 코드 및 SAASM(Selective Availability Anti-Spoofing Module; GPS 암호보안 모듈)을 탑재한 군사용 수신기는 스푸핑에 대응능력이 뛰어난 것으로 알려져 있다^[4].

현재 세계적인 기술추세로 볼 때 GPS 기만 재밍은 자체 GPS안테나를 통해 위성신호를 수신 후 정보를 분석하고 이를 기반으로 기만신호를 생성해야 하므로 장비가 크고 복잡하며 높은 기술수준을 필요로 하기 때문에 구현하기 어렵다. 특히 군용 P(Y)코드는 WAGE정보와 Y암호코드가 비공개 되어있기 때문에 기만재밍 기술을 구현하기는 더욱 어려운 것으로 보고되고 있다^[4].

2.2.2 항재밍 GPS 체계

일반적으로 군 항공기 항재밍 GPS 체계는 Fig. 3에서와 같이 SAASM을 탑재한 군용 GPS수신기를 기반한 배열안테나(Controlled Reception Pattern Array; 이하

Table 3. Types of GPS jamming

구분		내용	대응 방안
잡음재밍		높은 출력의 재밍신호를 송출해 목표 지역 내 GPS신호 획득 방해	항재밍안테나
기만재밍	미코닝 (Meaconing : 재방송 재밍)	GPS신호를 수신, 재방송함으로써 항법위치 분석에 혼란을 야기함	군용 GPS수신기 (SAASM 포함)
	스푸핑 (Spoofing : 허위신호송출재밍)	GPS 신호와 유사한 허위신호를 송신하여 허위정보를 유입함	



Fig. 3. Composition of anti-jamming GPS system

CRPA) 및 신호처리기(Antenna Electronics; 이하 AE)로 구성된다.

배열안테나와 신호처리기는 상관 전 신호처리기법 (Pre-correlation)에서 적용되는 다양한 기법들을 운용하여 항재밍 성능을 보유하게 된다^[8]. 상관 후 신호처리기법(Post-correlation)은 GPS수신기나 EGI(Embedded GPS/INS; 통합항법체계)에서 적용될 수 있는 기법이며, 이중 관성항법 연동 보정기술은 관성항법장치가 요구된다^[6].

구체적으로 현재 기술수준에서 구현되고 있는 항재밍 기법은 크게 Nulling, 그리고 Nulling & Beam Steering(Nulling & Beam Foaming) 기법으로 분류되고 있다. 이 중 Nulling 기법은 다시 아날로그와 디지털 기법으로 구분된다^[1,3].

아날로그 Nulling은 재밍 신호에 대해 수신각도를 거부하는 Spatial Filter를 적용하는 기법으로 약 20년 전부터 전력화 운용중이며 보통 J/S(GPS신호와 재밍신호 수신전력 비율) 30dB급으로 평가된다. 그러나 아날로그 기술을 적용하여 수신각도가 조절되기 때문에 상

대적으로 재밍방향의 위성신호 수신에 차단되는 현상 (Spatial-Black-Out)이 발생할 가능성이 높다^[14].

디지털 Nulling은 재밍 신호에 대해 시공간 필터를 이용하여 거부하는 기법으로 광대역 재밍 특성을 가진 재머 n-1개(n; 재머수) 이상의 거부가 가능하며 보통 J/S 40dB급으로 평가된다. 디지털 기술을 적용하여 Null-Point를 지정하므로 수신각도가 세밀하게 조절되어 상대적으로 Spatial-Black-out 현상의 가능성이 낮다.

디지털 Nulling & Beam Steering은 디지털 Nulling 기법에 위성 수신신호 방향으로 이득을 증가시켜 수신 방향을 지향하여 Spatial-Black-out 가능성을 줄이며 보통 J/S 50dB급으로 평가된다^[15]. 각 기법별 수신이득 패턴 개념은 Fig. 4와 같이 보다 세밀하게 적용 가능함을 보여준다.

SAASM은 Anti-Spoofing 기능과 함께 Direct-P(Y) 기능으로 C/A 코드를 거치지 않고 바로 군용 P(Y)코드를 수신할 수 있는 성능을 제공한다. 현재 체계 인증된 미국의 약 6개 업체에서 생산/공급하고 있으며, SAASM Embed Card에 장착되어 GPS수신기 및 EGI에

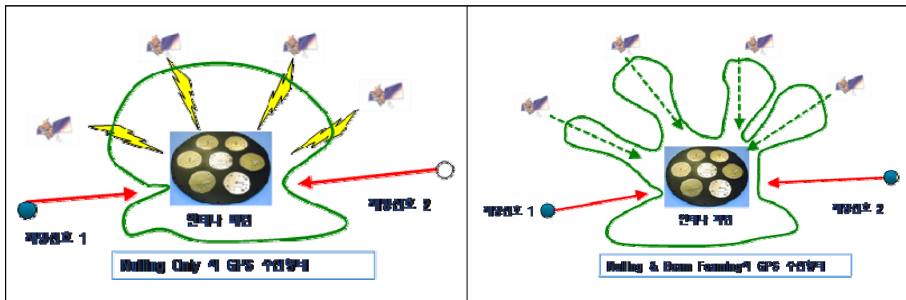


Fig. 4. Technique of anti-jamming GPS system

장입되며 FMS 계약 형태로 구매가 가능하다. SAASM 은 SAASM 장착 GPS수신기가 적대적 세력에게 들어 갔을 경우에도 보안체계를 해독할 수 없도록 개발되었다. 이는 암호화 기술의 발달 및 수신기의 전자구성 품 및 소프트웨어 부분에 대한 보안 모듈, 그리고 GPS 신호 보호를 위한 암호키의 입력 후에도 GPS수신기 하드웨어가 비밀로 분류되지 않도록 하는 새로운 Crypto-Key(보안키) 구조를 적용함으로써 가능하게 되었다. 또한 기존 PPS 방식의 군사용 GPS수신기와 달리 상용 C/A 코드 신호를 경유하지 않고 군용 P(Y) 코드 신호를 직접 획득할 수 있어 GPS 교란에 대응 능력이 매우 우수해졌다고 볼 수 있다.

군용 GPS수신기는 다양한 회사에서 생산 운용중이며, 현재 항재밍 GPS 체계와 연동가능한 항공기용 GPS수신기의 개발이 전 세계적으로 활발하게 이루어지고 있다. 그러나 SAASM 장착 가능한 GPS수신기는 현재 미국 업체에서만 생산 가능한 상황이다.

3. 체계 요구성능 분석

3.1 요구성능 도출을 위한 시나리오 설계 및 적용

항공기 항재밍 GPS 체계의 요구성능을 설정하기 위해서는 현재의 GPS재밍 위협에서 작전임무시 대응할 수 있는 능력치를 도출해야 한다. 따라서 먼저 ① 적 위협분석이 이루어져야 하고, ② 기종별로 GPS재밍 위협상황에서의 영향을 받는 임무를 분석해야 한다. 이후 ③ 위협상황과 임무를 적용한 시나리오를 설계하고 ④기종별 시나리오 환경에서 임무영향도를 분석하고 ⑤ 최종적인 요구성능을 도출할 수 있다.

위협과 임무에 기초한 시나리오 기반의 항재밍 GPS 체계 요구성능 분석 프로세스는 미국 등 관련 선진국에서 적용중이다. 특히 Lockheed Martin社의 경우 GIANT(Global Positioning System Interference and Navigation) Tool을 활용하여 정의된 재밍 시나리오를 구축하고, SAM(Spatial Anti-jam Model)을 통해 항재밍 성능을 검증하는 절차를 통해 요구성능에 부합하는 체계 설계를 수행하는 등 본 연구에 적용된 절차와 유사한 프로세스를 적용하고 있다.

3.1.1 시나리오 작성 기준 설정

시나리오 작성은 Table 4의 입력요소와 예상분석결과와 도출요소를 기준으로 하였다.

Table 4. Consideration element of scenario

분류	내 용
입력요소	- 기종별 작전 운용 개념 및 위협 상황
	- 임무 : 공격, 근접항공지원, 정보 수집, 전투지원, 탐색구조 등
	- 현 보유 능력 : 항재밍 대응능력(dB), 군용 GPS수신기 장착 여부
도출요소	- 위협조건 입력 : 재머수, 재머출력, 재밍운용 전술, 운용 환경 등
	- GPS 위협 환경하 임무 영향성 및 항재밍능력 요구치(dB)
	- 기종별 항재밍 GPS 체계 구축 소요

3.1.2 적 GPS 재밍 위협 환경 분석

적 GPS재밍 위협 환경은 군사 정보 자료 및 각종 기술 데이터 등을 활용하되 검증된 최신의 정보를 활용하여야 한다. 시나리오 설계에 필수적으로 입력되어야 할 GPS재밍 위협 자료는 Table 5와 같이 대상 지역에서 전술적으로 구사할 예상재머의 수, 배치 현황, 재머운용 전술, 각 재머의 규격 및 출력크기가 포함되어야 한다.

Table 5. Example of GPS jamming

분류	내 용
재머의 수	- 전체 000기 보유(차량 탑재형 재머 00기, 휴대/설치형 재머 0기)
배치 현황	- 전체 00개 지역에 배치 운용 중 - 후방 주요지역 00km 반경 휴대/설치형 재머 0기 운용 - 전방 주요지역 00km 반경 차량 탑재형 0기, 휴대/설치형 0기 운용
재머운용 전술	- 방어적 운용 : 재머 0기를 00km 반경에 중첩 배치 전략지역 방어 - 공격적 운용 : 재머 0기를 00km 반경에 배치, 지향성으로 운용
재머 규격	- 재머 A : 차량 탑재형 재머, 0기 1세트로 운용, 출력 0kW C/A, P(Y), GPS/GLONASS 사용 - 재머 B : 휴대/설치형 재머, 출력 00W, 짐승/기만 통합형 00kg, 고정/이동 플랫폼 사용(기구, 풍선, 항공기 등)

Table 6. GPS jamming level and mission category

GPS 재밍위협 노출수준		GPS 항법정확도 요구수준	
상	전시 적중심을 뚫고 들어가 GPS재머로 방어하고 있는 적 지역내 시설공격 임무를 수행하며, GPS유도무기를 운용하는 항공기	상	전시 주임무가 최상위수준의 항법정확도를 요구하며, 관련 센서 및 무장이 항공기GPS와 연동되어 GPS운용이 제한될 경우 임무에 막대한 지장을 초래하는 항공기
중	전시 MDL부근 GPS재머를 운용중인 지역에서 주로 임무하나, 임무가 중심 깊숙이 들어가지 않고 제공권 확보상황에서 임무하는 항공기	중	전시주임무가 상당한 수준의 항법정확도를 요구하나, GPS부작동시에도 기타 항법 장비로 제한된 임무수행이 가능한 항공기
하	전시 간헐적으로 GPS재머 공격적 운용 지역에 진입하지만 주로 후방지역 임무를 담당하며 후방 교란목적의 GPS재머 위협에 노출 가능성이 있는 항공기	하	전시 주임무가 일정수준의 항법정확도를 요구하나, GPS 부작동시에도 임무수행에 지장이 없는 항공기

3.1.3 기종별 임무분석을 통한 재밍 노출 수준과 영향 분석

기종별 임무 분석을 통한 GPS재밍 위협 노출수준과 임무 영향도 분석을 위해 해기종 작전교범 및 교관급 조종사와의 면담을 통해 관련 자료를 수집하는 등 면밀한 검토작업이 요구된다. 이에 따라 기종별로 등급을 설정하여 그룹화 하며, 그 선정기준은 Table 6과 같다.

3.1.4 GPS 재밍위협 및 임무 유형별 분류

기종별 임무 분석을 통한 GPS재밍 위협 노출 수준과 임무 영향도 분석을 수행하면 임의로 설정한 전체 대상기종을 Table 7과 같이 총 4개의 등급으로 분류할 수 있다. 이 중 5개 기종은 회전익기이며 기타 8개 기종은 고정익기로 전투기 2개, 공격기 2개, 수송기 2개, 정찰기 1개, 훈련 기 1개, 해상초계기 1개 기종으로 구성하였다.

Table 7. Classification of mission and level of navigation

대상기종		GPS교란 위협 노출수준	GPS 항법정확도 요구수준	분류 결과
기종 1	전투기	상	상	1 등급
기종 2	공격기	중	상	2 등급
기종 3	해상초계기		중	
기종 4	수송기	상	중	
기종 5	수송기	하	중	3 등급
기종 6	회전익			
기종 7	회전익			
기종 8	회전익			
기종 9	회전익			
기종 10	공격기	하	하	4 등급
기종 11	회전익			
기종 12	정찰기			
기종 13	훈련기			

일반적인 결과 예측시 선정결과 1, 2 등급은 주 임무가 적 중심을 뚫고 들어가 임무하는 위협수준 ‘중’ 이상의 기종들로 선정될 수 있으며, 3등급은 GPS교란 위협 노출 수준은 낮지만 임무가 항법정확도를 ‘중’ 수준으로 요구하는 기종들로 구성될수 있다. 4등급은 GPS교란 위협 노출수준 및 GPS 항법정확도 요구수준 모두 상대적으로 낮은 기종들이 선정될 것이다.

3.1.5 등급별 최고 수준 재밍 노출수준과 영향 분석

그룹화 작업 이후에는 각 그룹에서 현 보유 항재밍 능력 대비 적 GPS 교란 위협이 일반적으로 높을 것으로 예상되는 전시 주임무 시나리오를 설계하는 과정이 요구된다. 만약 해당 시나리오 위협상황에 대한 대응능력을 보유할 경우 해당 등급 그룹은 임무 상 접할 수 있는 대부분의 GPS교란 위협 시 요구되는 항재밍 GPS성능을 보유하게 될 것으로 가정할 수 있다. 이를 위해 항공기 그룹별 여러 가지 시나리오를 작성한 후 요구 성능을 도출한다.

3.1.6 그룹별 시나리오 설계

Fig. 5는 시나리오 설계의 한 예를 나타낸다. 모든

위험의 설정 및 배치 그리고 우군기의 진입 경로 및 임무 등은 앞서 분석한 위협 및 임무 분석에 기반한다. 재머는 기구 형식인 고도 1,000ft 상공에서 운용중인 50W 2기, 100W 2기, 그리고 차량 탑재형 800W 1기 등 총 5기의 재머가 중첩된 지역에서 항공기가 임무를 실시하는 상황을 보여준다. 여기서 격자 단위는 10km이며, 모든 재머는 무지향성 광대역 재밍 중인 것으로 설정하였다.

3.1.7 재밍관련 계산식 및 M&S를 활용한 시나리오별 요구성능 도출

작성된 시나리오에 대한 요구성능 도출은 계산식에 의한 방법과 M&S를 이용한 방법으로 수행할 수 있으며 구체적인 내용은 다음 장에서 다루기로 한다.

3.2 요구성능 도출

설정된 시나리오별로 요구성능을 도출하기 위한 방법으로는 J/S dB값 계산 및 동시 재머 위협 상황 분석에 따른 요구장비 산출이 있다. 항재밍 성능을 나타내는 dB를 계산하고, 해당 위협상황에서의 재머 위치와 영향 범위를 판단하여 요구장비 성능 정도를 파악

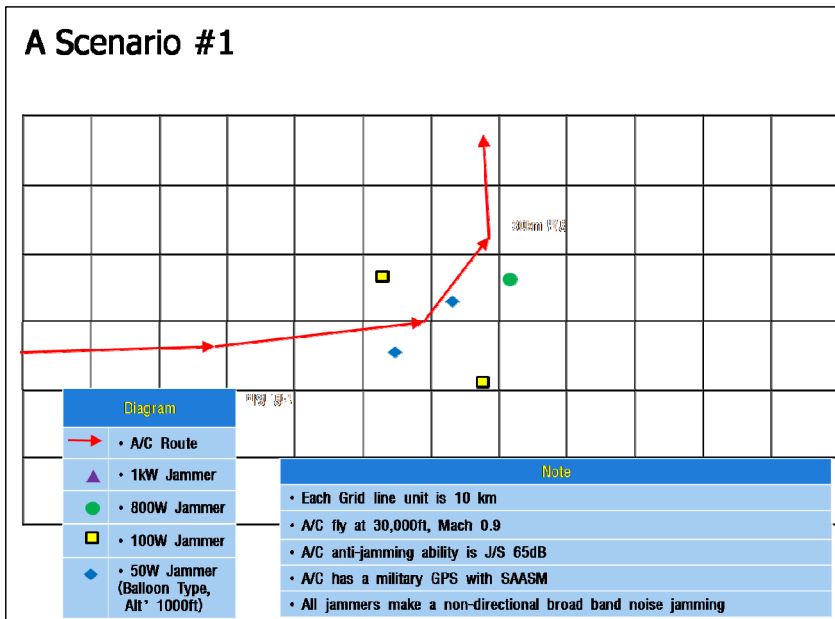


Fig. 5. Example of scenario design for judgement of relative influencing GPS jamming, it include basic aircraft specification(altitude, speed, and anti-jamming system etc)

Table 8. Related equations for anti-jamming GPS capability

$J/S(\text{dB}) = \text{재밍신호세기}(\text{dBW}) - \text{GPS신호세기}(\text{dBW})$ $(\text{GPS신호세기}(S) \approx -169\text{dBW})$	(1)
재밍신호 세기 $J = (\text{재머출력}) + (\text{안테나 이득}) - (\text{케이블 손실}) - (\text{자유공간손실})$ * 재머출력(dBW) = $10 \times \log_{10} \text{재머출력}(W)$	(2)
$\text{자유공간손실}(\text{dB}) = 10 \times \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 = 20 \times \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{c/f} \right)$ (f : 주파수(Hz), d : 거리(km), c : 광속 = 10×10^5 km/s)	(3)
$\text{영향거리}(\text{km}) = \frac{3 \times 10^5}{4\pi \times f} \times 10^{(\text{재머출력}-\text{GPS신호세기}-J/S)/20}$	(4)

하는 방법이다. 그밖에 M&S Tool을 활용하는 방법이 있는데, GPS 수신환경 설정 및 재밍 기법에 대한 가중치에 따라 M&S Tool마다 다소 결과값에 차이를 가질 수 있다.

3.2.1 계산식에 의한 요구성능 도출

설정된 시나리오별로 요구성능을 도출하기 위한 방법으로는 J/S dB값 계산 및 동시 재머 위협 상황 분석에 따른 요구장비 산출이 있다. 항재밍 성능을 나타내는 dB를 계산하고, 해당 위협상황에서의 재머 위치와 영향 범위를 판단하여 요구장비 성능 정도를 파악하는 방법이다. 그밖에 M&S Tool을 활용하는 방법이 있는데, GPS 수신환경 설정 및 재밍 기법에 대한 가중치에 따라 M&S Tool마다 다소 결과값에 차이를 가질 수 있다.

Table 8의 계산식은 잡음재밍에 대한 J/S를 계산하여 요구성능을 도출하는 것으로 GPS신호와 재밍신호의 수신전력 비율로 정의된다. 즉, J는 재머의 수신전력이며 S는 GPS 수신전력이 된다^[2]. S는 궤도별, 위성별로 차이를 가지기 때문에 보통 평균값을 계산하지만 최고 위협환경을 가정한 본 시나리오 분석에서는 수신기 최소수신감도를 고려한 보수적 관점에서 최소값을 취하였다.

J/S는 dB단위로 주로 계산이 이루어지며 식 (1)과 같이 재밍신호세기에서 GPS신호세기를 뺀 값으로 설정된다. 식 (2)의 GPS신호세기는 최저값을 적용할 경우 -169dBW로 설정된다. 재밍신호세기는 재머출력, 안테나 이득을 더한 값에 케이블 손실과 자유공간 손실을 뺀 값이다. 식 (3)의 안테나 이득과 케이블 손실

은 해당 재머 특성에 따른 상수 값으로 주어지고, 자유공간손실은 주파수, 거리와의 관계를 통하여 계산된다. 따라서 GPS 재밍의 영향거리는 위 (1)~(3)의 식들에서 산출한 값을 이용하여 식 (4)와 같이 구할 수 있다.

이상 공식에서 살펴본 바와 같이 GPS 항재밍 능력을 계산시 가장 큰 변수로 작용하는 것은 재머 출력과 재머와 수신기간 거리이며, 재밍 영향거리를 절반으로 줄이기 위해서 필요한 항재밍 능력은 약 6dB 단 위씩 요구된다.

시나리오 구성의 예인 시나리오 #1을 계산해보면 1kW 1기(10km), 50W 2기(5km), 100W 2기(10km)로 수신되는 재머의 입사전력의 합인 J는 -75dBW가 된다. S를 Table 9와 같이 최소 수신전력인 -169dBW로 가정하면, J/S 요구성능(dB) = -75dBW - (-163dBW)가 되어 J/S 요구성능은 88dB가 된다.

Table 9. Power of GPS satellite signal(ref: GPS theory and practice^[8])

Signal	Signal Level Minimum Power (dBW)	Signal Level Maximum Power (dBW)
L1 P(Y)	-166	-150
L1 C/A	-163	-150
L2 P(Y)	-169	-150
L2 C/A	-169	-150

또한 해당 계산은 시나리오 상 GPS재밍 위협이 최고점인 상황을 분석한 것으로 해당 시점에서 다수의 재밍 신호가 다방향에서 수신되는 것을 분석하여 항재밍 안테나의 Spatial Black Out을 방지하기 위한 요구장비가 필요하다는 것을 알 수 있다. 시나리오 #1을 예로 들면 항공기는 최고 위협 노출 시점에서 10km 이내의 근접한 거리에 있는 5개 재머의 영향 범위 내에 진입하며 5개 방향에서 재밍 신호를 받게 된다.

따라서 적어도 5방향의 Null을 위해 6배열 항재밍 안테나가 요구되며 재머 위치가 근접한 상황에서 안테나의 LOS(Line of Sight; 가시선) 확보가 어려울 경우에는 Beam-Steering 성능도 고려해야 할 것이다.

3.2.2 M&S Tool을 활용한 요구성능 도출

GPS항재밍 체계 관련 국가 및 업체들은 다양한 M&S Tool을 활용하여 요구성능을 도출하거나 재밍 영향성을 시험하고 있다. Fig. 6에서부터 Fig. 8은 M&S를 활용하여 항재밍 성능 분석을 한 예이다. 본 연구에서는 설계한 시나리오에 대하여 3개의 M&S를 활용하여 결과를 산출하였으며, 자체 계산에 의한 항재밍 성능 도출 값과 유사한 결과를 얻었다.

Rokar사 M&S 수행 결과는 Fig. 6과 같이 산출되었다. 그림에서 X축은 Azimuth(수평각), Y축은 Elevation

(고도각)을 의미하며 좌측 상단의 노란 원들은 GPS 위성 위치, 우측 하단의 검은 원들은 재머의 위치를 표현한다. 해당 M&S는 특정 항재밍 GPS 체계 장착 상황을 가정하여 시나리오를 분석하였으며, 그림의 붉은 지점은 정상 수신지역, 파란 지점은 Nulling 기법에 의한 수신 차단지역을 의미한다. 따라서 M&S 결과 특정 항재밍 GPS 체계 장착시 시나리오 상에 항공기는 정상 GPS 신호 수신이 가능하다¹³⁾.

Elisra사 M&S 수행 결과는 Fig. 7과 같이 산출되었다. 그림 중앙의 분홍색 원은 재머의 위치를 표현하고 있으며 분홍색 삼각형을 연결하고 있는 직선들은 항공기의 이동경로를 나타내고 있다. 해당 위협상황에서 요구되는 항재밍 능력은 푸른색에서 붉은 색으로 진행될수록 높아지며, 등고선 모양으로 재밍 범위를 표시하였다. 해당 시나리오에서 재머 위협에 가장 심각하게 노출되는 지점의 요구 항재밍 성능은 약 78dB로 산출되었다⁷⁾.

IAI사 M&S 수행 결과 Fig. 8 역시 Rokar사 결과와 유사하다. 우측 상단의 X 표시는 GPS 위성 위치, 하단의 초록색 지역 내 네모 표시는 재머의 위치를 나타낸다. 본 결과는 Nulling 기법에 의해 재머 방향의 수신 신호를 차단하고 다른 방향에서 정상적인 GPS 수신이 가능한 결과를 나타낸다¹⁷⁾.

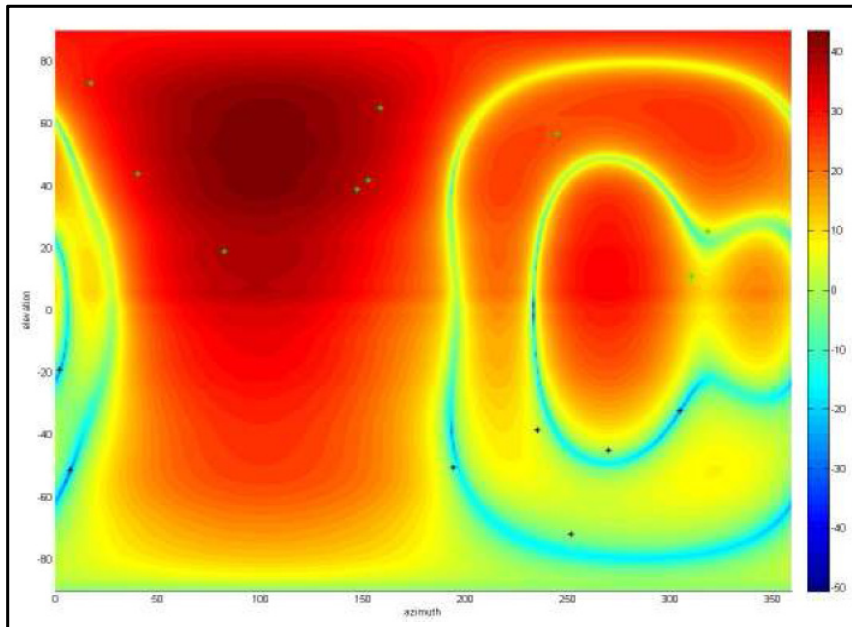


Fig. 6. M&S example of rokar

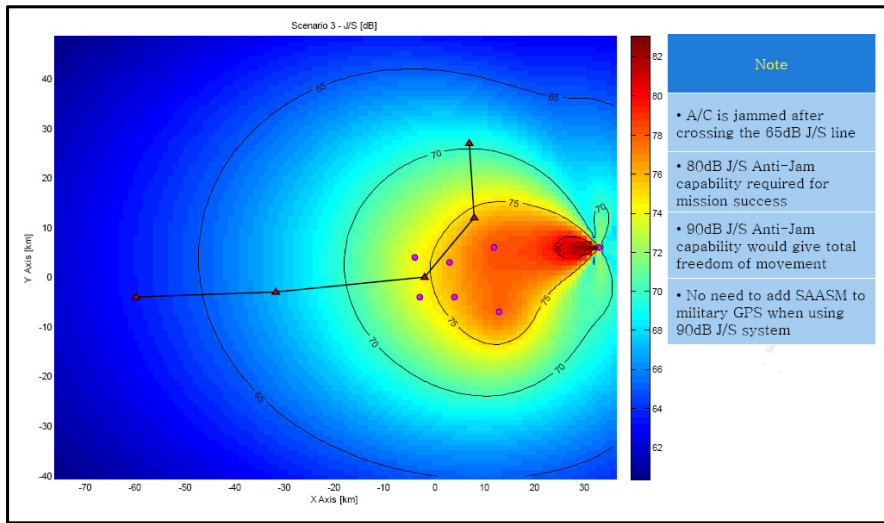


Fig. 7. M&S example of elisra

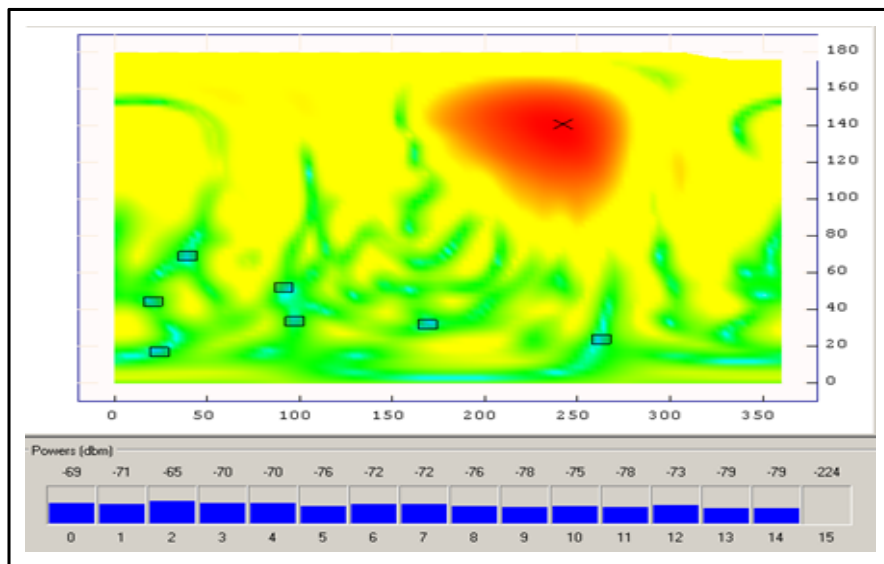


Fig. 8. M&S example of IAI

4. 체계 구축 최적화 방안

본 장에서는 신호처리기와 배열안테나 등 항재밍 GPS 체계 구성품을 대상으로 제한된 획득비용간의 최적의 항재밍 GPS 체계를 선정하기 위한 최적화 방안을 제시한다. 이를 위해 수리모형을 구축하고, 다양한 예산범위에서 결과를 도출하여 이를 분석하였다.

4.1 수리모형 설계

4.1.1 인덱스 및 집합

항공기에 대한 집합은 육, 해, 공군에서 운용중인 고정익 및 회전익 항공기 중 임의의 13개 기종을 대상으로 하였다. 회전익 기종 5개는 별도의 하부집합으로 지정하였다. 두 번째 집합은 신호처리기(AE)로 총 5개 장비를 대상으로 하였다. 세 번째 집합은 배열안테나

Table 10. Set and indices

Indices and Sets
$i \in I$ 대상기종집합, $I = \{\text{기종1, 기종2, 기종3, } \dots, \text{기종n}\}$ 하부집합, $I_{hel} = \{\text{헬기1, 헬기2, } \dots, \text{헬기m}\}$, $I_{hel} \subset I$
$p \in P$ 신호처리기 제품 집합, $P = \{\text{AE1, AE2, } \dots, \text{AEk}\}$
$q \in Q$ 배열안테나 제품 집합, $Q = \{\text{4-배열안테나, 5-배열안테나, } \dots, \text{8-배열안테나}\}$

의 배열수를 나타내는 것으로 4, 5, 7, 8 배열 제품을 대상으로 하였다. 본 연구에서 제시된 대상 기종 및 장비 등은 모두 실제 값이 아닌 임의로 설정한 값이 적용되었으며, 특정 업체와는 관련이 없음을 밝힌다. 인덱스 및 집합 구성은 Table 10과 같다.

4.1.2 데이터 및 매개변수(Parameter)

본 모형과 관련된 대상기종 및 항재밍 GPS 장비에 대한 성능 및 가격에 대해 나타난 값이며 Table 11와 같으며 군 요구도에서 도출된 기종별 설치 소요량, 총 획득비용과 최대 대응 재머수, 최소 요구성능을 파라미터값으로 활용한다.

Table 11. Data and parameter

Parameters	
MIN_NO_Jammer _i	최대 대응 재머수
MIN_Req_Capa _i	최소 요구성능
Install_req_NO _i	기종별 설치 소요량
AE_Capa _p	신호처리기 성능
AE_Price _p	신호처리기 가격
No_Array _q	안테나 배열수
Ant_Price _q	안테나 가격
Total_Budget	총 획득 비용

4.1.3 결정변수

Table 12에서 보는 바와 같이 대상 기종에 어떤 신호처리기와 배열안테나를 선택하여야 할 것인가에 결정하는 변수이다.

Table 12. Decision variables

결정변수(Variables)	
x_{ip}	신호처리기 선택, 0 또는 1 이진변수
y_{iq}	항재밍 안테나 선택, 0 또는 1 이진변수
w_p	한 종류의 제품만 선택하는 이진변수

4.1.4 목적함수 및 제약조건

목적함수는 항재밍 GPS 체계 성능을 최대화하는 것으로 설정한다. 목적함수는 다음 Table 13의 식 (1)과 같다. 체계 구축을 위한 6개의 제약조건(Constraint)을 지정하여 해당 제약조건 상황에서 GPS에 대한 항재밍 성능을 최대화하도록 하였다. 식 (2)는 기종별 항재밍 GPS 체계 구성품 선택시 하나의 제품(신호처리기, 안테나)만 선택할 수 있음을 의미한다. 식 (3)을 통해 기종별 항재밍 GPS 체계 구성품 비용은 총 획득 비용을 초과할 수 없도록 하였다. 식 (4)는 각 기종별 최소 요구성능 이상의 신호처리기를 선택하여 보유해야 함을 의미한다. 식 (5)는 각 기종별 항재밍 GPS안테나 배열수는 대응하는 재머수+1을 이상을 선택해야 한다. 식 (6)은 회전익 기종은 장착 공간의 제한으로 4배열 이상의 안테나는 장착할 수 없다.

(1)~(7)의 제약식으로는 구체적인 사업 특성을 고려하지 할 수 모형이다. 따라서, 본 사업은 단일업체 제품을 선정해야하므로 다음의 식 (8)이 요구된다.

$$\text{Maximize } \frac{1}{|I|} \sum_{i \in I} \sum_{p \in P} \text{AE_Capa}_p \cdot x_{ip} + \sum_{i \in I} \sum_{q \in Q} \text{No_Array}_q \cdot y_{iq} \tag{1}$$

$$\text{Sub. to. } \sum_{p \in P} x_{ip} = 1, \sum_{q \in Q} y_{iq} = 1, \forall i \in I \tag{2}$$

Table 13. Requirement of capability

구분	최대 대응 채머수(대)	최소 요구 성능(dB)	소요량 (대수)
기종1	6	25	60
기종2	6	15	60
기종3	3	25	8
기종4	3	20	22
기종5	6	30	8
기종6	6	30	12
기종7	6	30	20
기종8	3	20	3
기종9	3	25	20
기종10	3	25	37
기종11	3	25	11
기종12	3	20	8
기종13	3	25	14

$$\sum_{i \in I} \sum_{p \in P} \text{Install_req_NO}_i \cdot \text{AE_Price}_p \cdot x_{ip} + \sum_{i \in I} \sum_{q \in Q} \text{Install_req_NO}_i \cdot \text{Ant_Price}_q \cdot y_{iq} \leq \text{Total_Budget} \quad (3)$$

$$\sum_{p \in P} \text{AE_Capa}_p \cdot x_{ip} \geq \text{MIN_Req_Capa}_i, \quad \forall i \in I \quad (4)$$

$$\sum_{q \in Q} \text{No_Array}_q \cdot y_{iq} \geq \text{MIN_NO_Jammer}_i + 1, \quad \forall i \in I \quad (5)$$

$$\sum_{q \in Q} \text{No_Array}_q \cdot y_{iq} \leq 4, \quad \forall i \in I_{Hcl} \quad (6)$$

$$x_{ip}, y_{iq}, w_p \text{ Binary Variable}, \quad \forall i \in I, p \in P, q \in Q \quad (7)$$

$$\sum_{p \in P} w_p = 1, \quad 0 * w_p \leq \sum_{i \in I} x_{ip} \leq |I| * w_p, \quad \forall p \in P \quad (8)$$

입력 값으로 Table 14는 기종별 요구성능을 나타내며, Table 15는 항재밍 GPS 체계 대상 제품군에 대한 성능 및 가격을 나타낸다.

Table 14. GPS anti-jamming product

(unit price : \$10,000)

구분	제품	성능(dB)	비용
신호 처리기	AE1	42	7
	AE2	45	10
	AE3	40	7.5
	AE4	38	6.5
	AE5	35	6.2
구분	제품	비용	배열수
배열 안테나	4-배열 안테나	15	4
	5-배열 안테나	18	5
	7-배열 안테나	21	7
	8-배열 안테나	24	8

Table 15. Selection of Antenna electronics for each aircraft

(총 가용예산 7.8백만불)

구분	AE1	AE2	AE5
기종1	○		
기종2			○
기종3		○	
기종4	○		
기종5		○	
기종6		○	
기종7		○	
기종8		○	
기종9	○		
기종10		○	
기종11		○	
기종12		○	
기종13	○		

4.2 수리모형 적용 결과 분석

본 수리모형을 최적화 프로그램을 적용한 결과는 가용예산별 항재밍 GPS 체계의 최적방안(신처리기, 배열 안테나 조합)을 산출한다.

4.2.1 신호처리기 선택

Table 14과 15는 가용예산을 1천만불을 기준으로 적용했을 때 최적 가용 예산은 7.8백만불을 사용하여 기종별 최적의 신호처리기 및 안테나 선택 조합을 나타낸다. 신호처리기 중 가장 성능이 우수한 AE2는 8개 기종에서 선택되었으며, 소요 수량이 가장 많은 기종1, 2는 비용의 제약으로 각각 AE1, AE5가 선택되었다. 두 번째로 성능이 우수한 AE1은 4개 기종에서 선택되었고, 소요량이 가장 많은 1개 기종2는 성능이 상대적으로 떨어지는 AE5를 선택한 것을 알 수 있다.

4.2.2 항재밍 안테나 선택

항재밍 안테나는 4, 5, 7, 8 배열까지 장착이 가능하다. 그러나 배열수가 많을수록 비용도 증가하게 된다. Table 16과 같이 회전익 기종 5개는 4-배열안테나로 고정된 값을 가지게 된다. 고정익 8개 기종 중에서는 1개 기종이 5-배열안테나, 5개 기종이 7-배열 안테나, 2개 기종이 8-배열안테나를 선택하였다.

4.3 결과 분석 종합

가용비용을 7백만불부터 9.1백만불까지 0.2 백만불 단위로 분석한 결과, 단위 기종별 최적비용은 가용비용 범위에서 20,000~35,000불 사이에서 결정되었으며, 성능은 38.2~45dB, 안테나 배열수(기종별 대수×안테나 배열수)의 총합은 5,205~6,135배열까지 산출되었다.

Table 16. Selection of anti-jamming antenna for each aircraft

구 분	4-배열	5-배열	7-배열	8-배열
기종1			○	
기종2			○	
기종3	○			
기종4			○	
기종5				○
기종6				○
기종7			○	
기종8	○			
기종9			○	
기종10	○			
기종11	○			
기종12		○		
기종13	○			

Fig. 9는 실험결과를 종합한 것이다. 성능은 7백만 불부터 8.4백만불 구간까지는 비용의 증가에 따라 지속적으로 상승하지만 비용이 높아질수록 성능이 증가

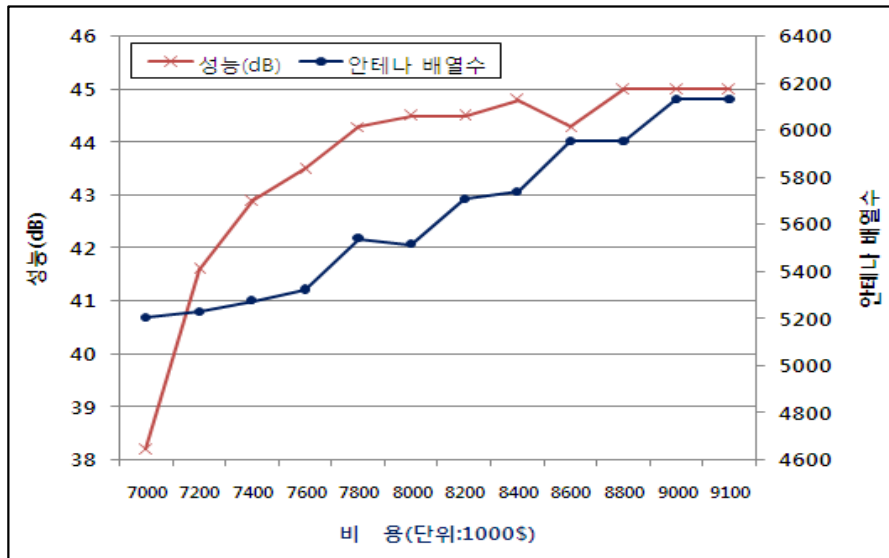


Fig. 9. Experiment results

가 둔화되었다. 8.4 백만불에서 8.6백만불 구간에서는 일시적으로 성능이 하락했는데, 이 구간은 안테나 배열수를 증가시키기 위해 성능이 소폭 하락하는 최적화 과정으로 분석되었다.

성능은 8.8 백만불 이후 최대 성능인 45dB로 고정되었으며, 이후 비용증가는 성능 향상에 영향을 미치지 못했다. 안테나 배열수는 전체 비용 구간에서 지속적으로 증가를 보였다. 그러나 7.8백만불에서 8.0백만불 구간에서 유일하게 일시적인 소폭 감소가 이루어졌다. 이는 성능하락 구간과 마찬가지로 dB 성능을 증가시키기 위해 안테나 배열수가 소폭 감소하는 과정으로 분석된다.

5. 결론

본 연구에서는 군용 P(Y)코드를 적용한 항공기 항재밍 GPS 체계를 대상으로 요구성능을 분석하고 이를 기반으로 기종별 체계구축과 관련된 최적화 수리 모형을 구성하였다. 이에 따라 항공기 항재밍 GPS 체계 구축에 요구되는 전반적인 프로세스를 제시하고 가용 예산 및 사업 특성에 따른 기종별 최적화 방안을 다음과 같이 도출하였다.

먼저 시나리오 기반의 요구 성능 설정 프로세스를 제시하였다. 7단계로 구성된 요구 성능 설정 과정을 통해 위협 및 임무에 기초한 설정이 가능함을 알 수 있다. 그 다음 단계로 설정된 성능 기준에 의거하여 제시된 수리모형을 적용한 결과 기종별로 최적화된 항재밍 GPS 체계 구축 방안을 도출하였다. 이 때 획득 비용 변화에 따라 성능 및 체계 구성은 일부 가변적 특성을 가짐과 함께 전반적으로 성능이 향상되는 결과를 나타냄을 알 수 있다.

본 연구를 통해 우리 군도 향후 각종 군사용 GPS 무기체계 요구 성능 기준 설정에 있어서 이러한 M&S 방법론 및 정량적 접근법을 동시에 고려해야 할 것이다. 또한 상기 체계와 연계된 무기체계 도입을 검토하는 단계에서 명확한 체계 구축방향 설정 및 적정 요구 성능 판단 등 효율적인 사업추진을 위해서는 경제성 요소도 함께 고려하는 것이 중요하다. 아울러 본 방법론을 항재밍 GPS 체계와 유사한 복합 구성 체계를 포함하는 他 무기체계 도입 시 활용한다면 성능 대 비용 효과 측면을 동시에 고려한 최적 절충방안을 수립하는 데 기여할 것으로 판단된다.

References

- [1] J. Kim, "Technique of Pattern Control GPS CRPA using I/Q Vector Modulator," Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology, Vol. 9, No. 3, pp. 48-55, 2006.
- [2] Y. Nam, and B. Park, "Test Report of GPS Jamming", Agency of Defense Development, 2003.
- [3] K, Song, "Basic Concept of GPS Signal Acquisition and Operations," Agency of Defense Development, 2013.
- [4] Y, Yu., "Aquisition Plan of Anti-Jamming GPS System for ROK Air Force," Air Force College, 2008.
- [5] S, Lee et. al., "Study of Filter Design for Jamming Detection Technique and Strong Resistance DSP," Agency of Defense Development, 2006.
- [6] J, Han et. al., "Analysis of Adaptive Signal Processing for Anti-Jamming GPS," Journal of Korean Communication, Vol. 32, No. 8, pp. 745-757, 2007.
- [7] ATK, "Response to DAPA RFI: Aircraft Anti-Jam GPS," 2013.
- [8] B. Hofmann-Wellenhof et al., "GPS Theory and Practice," Springer NewYork, pp. 201-203, 2001.
- [9] Corrigan et al., "GPS Risk Assessment Study Final Report," Air Transport Association, 1999.
- [10] David S. DE Lorenzo et al., "Adaptive Array Processing for GPS Interference Rejection," Proceeding of ION GNSS 2005, Long Beach CA, US., 2005.
- [11] David S. and Lorenzo D., "Navigation Accuracy and Interference Rejection for Adaptive GPS Antenna Array," Proceeding, ION GNSS 2006, pp. 763-773, 2006.
- [12] Holm, "Why Convert to a SAASM-based Global Positioning System?," Military Embeded Systems, 2006.
- [13] IAI, "IAI Response to the Republic of Korea - ROK Defense Acquisition Program Administration - DAPA RFI," 2013
- [14] Kandangath., "Jamming Mitigation Techniques for Spread Spectrum Communication Systems," IEEE,

- Singnal Processing for Wireless Communications, 2003.
- [15] Pace et al., "The Global Positioning System: Assessing National Policies," RAND Corporation, 2009.
- [16] Rifkin, Vaccaro, "Comparison of Narrowband Adaptive Filter Technolgies for GPS," MITRE Technical Report MTR 00B000015, 2000.
- [17] Rokar, "BAE Systems Rokar Response DAPA RFI GPS AJ for Aerial Platform," DAPA, 2013.
- [18] Trinkle M., "GPS Interference Mitigation; Overview and Experimental Results," Proceedings of the 5th International Symposium on Satelite Navigation Technology & Application, Canberra, Australia, 2001.