

한국군 대포병탐지레이다의 탐지 주파수 선정을 위한 RCS 및 송신 출력 측정

송윤호*, 하용훈**

RCS and Transmitted Power Measurement to Select Detection Frequency of the ROK Army's Counter-battery Radar

Younho Song*, Yonghoon Ha**

요 약

레이다 단면적(RCS; Radar Cross Section)은 표적을 탐지하는 데 중요한 파라미터이며, 이는 표적의 모양과 크기, 탐지각도와 더불어 표적을 탐지하는 레이다의 송신 주파수에 따라 서로 달라진다. 대포병탐지레이다는 비행하는 포탄을 탐지하고 탄종을 식별하며, 탄도의 계산을 통해 화포의 위치를 추정하는 장비이다. 한국군이 운용하는 레이다의 탐지확률을 높이기 위해서는 실제 운용하는 제대에서 탐지하는 표적에 대하여 RCS가 최대가 되는 주파수를 선정하여야 한다. 본 논문에서는 한국군 진장 환경에 적합한 표적을 선정하고 물리광학기법(PO; Physical Optics)을 활용해 표적의 RCS를 계산하였다. 또한 RCS의 평균이 최대가 되는 C 대역의 주파수를 선정하였으며 해당 최적 주파수에서의 송신 출력의 개선을 확인하였다.

Abstract

Radar cross Section (RCS) is an important parameter to detect a target, and it varies depending on the shape, size, detection angle of the target as well as the transmission frequency of the radar. The Counter-battery radar detects the flying projectiles, identifies their types, and estimates the position of the artillery by calculation the trajectory. In order to increase the detection probability of the radar, it is necessary to select a frequency that maximizes the RCS with respect to the target detected by the actual operating units. In this paper, a target suitable for the Korean military battlefield environment was selected and the RCS of the target was calculated using physical optics (PO). In addition, the frequency of the C band where the average of the RCS is the maximum was selected, and the improvement of the transmission power at the optimal frequency was confirmed.

Keywords

counter-battery radar, radar cross section, detection frequency, physical optics, transmitted power

* 국방대학교 국방과학학과 무기체계전공 석사과정

- ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3257-5186>

** 국방대학교 국방과학학과 무기체계전공 교수(교신저자)

- ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2516-9510>

• Received: May 13, 2022, Revised: Jul. 20, 2022, Accepted: Jul. 23, 2022

• Corresponding Author: Yonghoon Ha

Dept. of Defence Science, Korea National Defence University,
Chungnam, Korea

Tel.: +82-41-831-5323, Email: yonghoonha@korea.kr

I. 서 론

우리나라와 휴전선에서 대치중인 북한군의 포병 화력은 1970년대부터 대폭적으로 증강되어 2010년 기준 자주포와 견인포가 약 8,500문, 방사포를 약 5,100문 가량을 보유하고 있는 것으로 알려져 있다 [1]. 특히 북한군 포병은 전력의 다수를 평양~원산 이남에 배치하고 있어 우리나라 군사안보의 대표적인 위협이 되고 있다. 북한의 김정은이 ‘현대전은 포병전’이라고 언급하며 지속해서 포병 전력 증강에 힘을 쓰는 이유는 포병이 타 무기체계에 비해 적은 환경적 제약에서도 운용이 가능하고, 장거리에서 사격이 가능하며, 자주화를 통한 기동성 확보로 원하는 시간에 원하는 장소에서 화력을 운용할 수 있기 때문이다.

이에 따라 현대전에서 대포병탐지레이다의 중요성은 더욱 부각되고 있다. 대포병탐지레이다는 표적인 포탄을 탐지하여 탄종을 식별하고, 계산을 통해 포탄의 예상 탄착지점 및 사격원점을 확인할 수 있는 장비이다. 탐지 빔을 통해 여러 개의 포탄을 동시에 식별하고 단시간에 원점의 좌표를 획득할 수 있는 대포병탐지레이다는 적 포병을 적지중심팀, 드론, UAV 등을 활용하여 식별하는 동안 발생하는 현실적인 제약을 극복하고 아군의 생존성과 대화력전의 작전 능력을 동시에 향상할 수 있는 필수적인 장비이다.

한국군은 대화력전 능력 향상을 위해 대포병탐지레이다의 운용과 개발에 많은 노력을 기울였다. 1980년대 영국에서 수입한 대포병탐지레이다를 최초로, 1994년 미국의 AN/TPQ-36과 AN/TPQ-37 레이다를 추가 도입하였고, 스웨덴 SAAB사의 ARTHUR를 기술협력생산하며 효과적인 대화력전을 할 수 있는 환경을 조성하였다. 이후 LIG넥스원에서 수년 간의 개발과정을 거쳐, 차기 국산 장비인 대포병탐지레이다-II가 2017년 ‘전투형 적합’ 판정을 받은 이후, 2019년부터 전력화가 진행되며 군단과 사단급 부대에 배치되고 있다[2]. 사거리의 증가와 더불어 자주화, 궤도화를 통해 생존력을 향상하고 있는 북한군의 포병 전력에 대응하기 위해 대포병탐지레이다는 한국군에 필수적인 무기체계이다.

대포병탐지레이다는 지정된 주파수 밴드 내에서

특정 주파수의 빔을 선정하여 방사할 수 있으나, 그 중 탐지에 가장 용이한 주파수가 무엇인지는 정해져있지 않다. 표적을 탐지함에 있어 핵심 파라미터인 레이다 단면적(RCS, Radar Cross Section)은 표적에서 반사되어 레이다의 안테나 수신기로 들어오는 신호의 크기를 말한다. RCS는 표적의 크기, 모양, 반사되는 각도, 송신기와 수신기 편파 특성 등과 더불어 송신주파수와 파장에 따라 달라진다[3]. 한국군의 대포병탐지레이다는 북한군의 포탄과 방사포탄을 주로 탐지하고, 한국군의 포탄 또한 탐지하여 탄착지점을 예측한다. 따라서 레이다가 탐지할 목표물을 특정하고 해당 목표물의 RCS를 가장 높게 나타내는 주파수를 운용하여 탐지확률을 높일 필요가 있다.

본 연구에서는 대포병탐지레이다의 운용 주파수 밴드를 선정하고, 한반도 전장에서 대포병탐지레이다가 탐지할 특정 표적에 대해 시뮬레이션을 이용하여 RCS를 해석하였다. 이를 통해 주파수에 따른 탐지율의 차이를 확인하여 한국군 대포병탐지레이다 운용에 있어 최적의 주파수를 확인하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 관련된 기존의 연구들을 소개하며, 3장에서는 표적 선정과 모델링, 그리고 레이다 파라미터 선정과 시뮬레이션 환경을 소개하였다. 4장에서는 FEKO 소프트웨어를 이용한 시뮬레이션 결과 분석을 통해 탐지율이 가장 높게 나오는 최적 주파수를 확인하고, 해당 주파수를 사용하였을 때의 송신 출력의 변화를 확인하였다. 마지막으로 5장에서 결론 및 향후 발전 과제를 제시하였다.

II. 관련 연구

2.1 RCS 해석에 따른 주파수별 탐지확률

Lim[4] 등은 레이다에서 목표물의 RCS의 값이 최대가 되는 주파수를 운용할 경우 타 주파수에 비해 낮은 송신 출력이 요구되며 동일 출력에서 탐지확률이 개선됨을 확인하였다. 이 연구는 구형, 원뿔구, 환형 원뿔, 이중 원뿔의 4가지 이론적 모형을 기반으로 수행되었다. 해당 모형의 RCS를 측정하는 수식과 레이다 방정식, 레이다의 탐지확률 식을 통

해 주파수와 송신 출력, 탐지확률 간의 상관관계를 증명하였다.

Im[5] 등은 VHF, UHF, L 대역 등 3개 대역에서 항공기에 대한 모노스테틱 RCS와 각도별 바이스테틱 RCS를 계산하여 RCS값을 크게 나타내는 대역에 대한 연구를 수행하였다. 동 연구에서는 MIG-29 등 일반 항공기 3개 기종과 F-22 등 저 RCS 항공기 5개 기종을 선정하였다. RCS 해석을 위해 PO기법을 사용하였으며, 플라스틱 모형을 스캐닝하여 확대한 뒤 CAD 모델링을 시행하였다. 이를 통해 일반 항공기는 상대적으로 높은 주파수 대역인 L 대역에서 RCS가 가장 크고, 저 RCS 항공기는 가장 낮은 주파수 대역인 VHF 대역에서 RCS가 가장 큰 것을 확인하여 각 특성별 탐지에 유리한 대역을 제시하였다.

위 선행연구는 이론적 모델과 항공기 모델 등을 통해 다양한 주파수 대역에 따른 표적의 RCS의 차이를 제시하였다.

2.2 PO기법을 통한 포탄의 RCS 해석

Kenyon 등은 FEKO와 미국 육군 연구소의 자체 해석 도구인 AFDTD를 사용하여 RCS를 해석하였다. [6]에서는 L, S, C, X 대역 등의 4개 대역에서의 포탄 및 방사포탄에 대한 RCS 해석을 수행하였으며, 155mm 포탄과 107mm 방사포탄 등에 대한 RCS 해석결과를 방위각에 따른 주파수 대역별로 제시하였다. [7]에서는 155mm 포탄에 대해서 바이스테틱 대포병탐지레이다의 송신기 및 수신기의 각도별 RCS 해석값을 제시하였다. 위 연구들을 통하여 포탄의 비행 간 각도 변화에 따른 RCS 데이터 테이블을 제시할 수 있었으며, 해석 도구를 통한 대포병 탐지레이다 성능 연구의 유효성을 입증하였다.

Park[8] 등은 PO기법을 통해 탄도미사일의 RCS를 예상 미사일 궤적과 레이다 위치에 따른 관측각도 별로 해석하여 레이다 위치에 따른 탐지율의 차이를 제시하였다. 위 연구에서는 탄도미사일의 비행 특성을 고려하여 서로 다른 관측지점에서 사거리 300km, 500km의 미사일 탐지에 대한 평균 RCS를 3GHz 대역에 대해 제시하였으며, 탄도미사일의 조기 탐지를 위해 RCS가 크게 측정되는 위치에 레이

다 배치의 필요성을 확인하였다.

Yang[9] 등은 FEKO의 PO기법을 통해 실제 유도탄의 형상과 설계한 유도탄의 형상의 RCS를 해석 및 비교하였다. 위 연구에서는 지정된 탐지각도에 대한 평균 RCS의 비교를 통해 RCS를 저감할 수 있는 동체형상을 제시하였다.

위 선행연구를 통해 포탄의 RCS 해석에 대해 PO기법의 적절성을 보여주었으며, 본 논문의 해석 기법으로 선정하였다.

III. 모델링 및 실험환경 구성

3.1 탐지 대상 선정

표 1은 본 연구에서의 탐지 대상으로 선정한 총 8종류의 포탄과 각각 운용 장비들의 제원을 나타낸다[10]-[12]. 대포병탐지레이다는 한국군의 전방 사단 및 군단에 배치되어 대화력전을 위한 북한의 포탄을 주로 탐지하며, 아군 포탄을 탐지하여 탄착지점을 예측하는 역할을 수행할 수도 있다. 따라서 탐지 대상은 대화력전에서 주요 위협이 되는 북한군 사단 및 군단급에서 운용하는 자주포(SP; Self Propelled) 포탄과 방사포(RL; Rocket Launcher) 포탄으로 한정하였으며, 각 무기체계별 공개된 제원 또는 호환되는 탄종을 선정하였다. 정확한 제원과 호환하는 장비가 공개되지 않은 북한의 170mm 자주포 포탄의 경우, 동일 구경의 공개된 포탄의 제원을 사용하였다[13].

표 1. 탐지 대상 선정
Table 1. Selection of detection targets

Section		Calibre	Model	Projectile
NKPA	Division arty	107mm RL	Type-63	Type63-2
		122mm SP	M-1985	OF-472
			M-1991	
		122mm RL	BM-21 /Grad	9m22
	152mm SP	M-1977	OF-540	
	Crops arty	130mm SP	M-1975	OF-33
		170mm SP	M-1978 /Koksan	Unknown
240mm RL		BM-24 /Katyusha	F961	
ROKA		155mm SP	K-9	M107

3.2 PO 모델링

컴퓨터를 이용한 RCS 해석 기법으로 저주파수 해석기법과 고주파수 해석기법이 있으며, 고주파수 해석기법은 입사하는 파장에 비해 크기가 큰 표적들을 예측하기 적합하여 미사일, 항공기, 함정 등의 RCS 해석에 적합하다. 고주파수 해석기법으로는 물리광학(PO)기법, 기하광학(GO; Geometrical Optics)기법, 기하회절이론(Geometric theory of diffraction) 등이 있다[14]. 본 논문에서는 고주파수 기법 중 PO기법을 사용하였으며, 이는 처리속도가 빠르고 다른 고주파수 기법에 비해 정확도가 상대적으로 높은 장점이 있다[15].

그림 1은 CAD FEKO를 이용하여 제작한 8종류 표적의 실스케일 매쉬 형상이다. FEKO에서는 PO기법간 선택 가능한 광선추적법(Ray tracing)을 full ray tracing, always illuminated, only illuminated from front의 3가지로 제시한다.

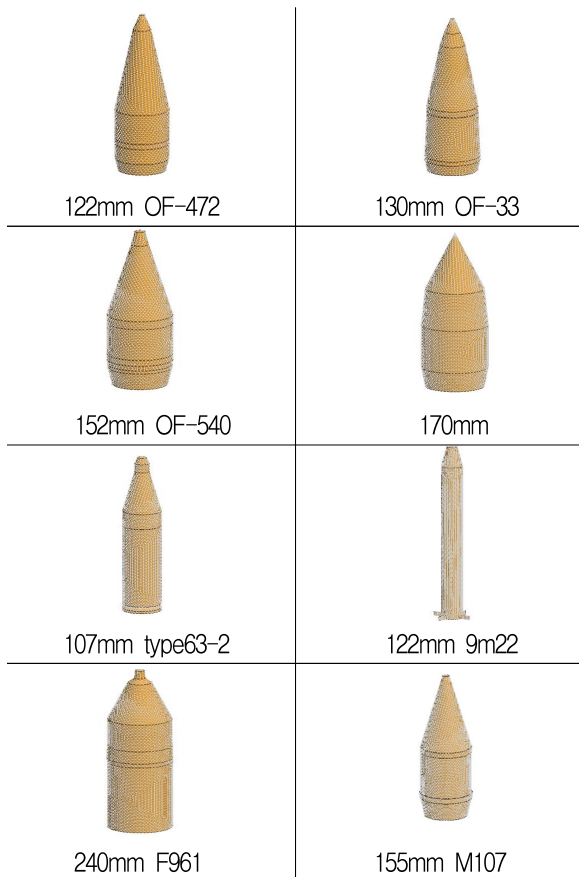


그림 1. 포탄의 실스케일 매쉬 모델링 형상
Fig. 1. Real scale mesh modeling of projectiles

이 중 해석시간이 오래 걸리지만 입사 파장의 영향을 가장 많이 고려하는 full ray tracing 기법을 사용하였다. 표면 매쉬 형태는 거칠게(Coarse) 설정하였으며, 거친 표면 형태는 매쉬의 모서리 길이를 파장의 1/6수준으로 만들어준다[16]. 파장의 1/6수준은 본 논문에서 다루게 될 주파수의 중간값인 5.66GHz를 기준으로 약 9mm의 모서리 길이에 해당한다. 이때 122mm 방사포탄 9m22의 경우 프로그램의 매쉬 수의 제한 오류를 극복하기 위해 별도로 1/4파장의 길이인 13mm의 매쉬 크기로 설정하였다.

3.3 탐지레이다 파라미터

식 (1)은 레이더 방정식으로, 신호 대 잡음비(SNR; Signal to Noise Ratio)를 레이더의 주요 파라미터와 RCS에 대해 표현한 관계식이다[17].

$$SNR = \frac{P_t G \sigma A_e}{(4\pi)^2 k T_0 B F R^4} \quad (1)$$

여기서 P_t 는 송신 출력, A_e 는 안테나 면적, G 는 안테나 이득, σ 는 RCS, k 는 볼츠만 상수, T_0 는 잡음 온도, B 는 수신기 대역폭, F 는 수신기 잡음 지수, R 은 탐지거리, P_D 는 탐지확률을 나타낸다.

안테나 탐지확률은 Marcum Q함수를 통해 나타나며 식 (2)와 같다[17].

$$P_D = Q\left[\sqrt{\frac{A_e^2}{\sigma^2}}, \sqrt{2\ln\left(\frac{1}{P_{fa}}\right)}\right] \quad (2)$$

여기서 P_{fa} 는 탐지 오경보율을 나타내고, $Q[\dots]$ 는 Marcum Q 함수이며 식 (3)과 같다.

$$Q[a, b] = \int_b^\infty \xi I_0(a\xi) e^{-(\xi^2 + a^2)/2} d\xi \quad (3)$$

여기서 a 와 b 는 음이 아닌 실수이며, I_0 는 0차 제 1종 변형 베셀함수를 나타낸다.

그림 2는 식 (1)과 식 (2)를 통해 주파수와 송신 출력에 따른 탐지확률을 나타낸 것이다[4].

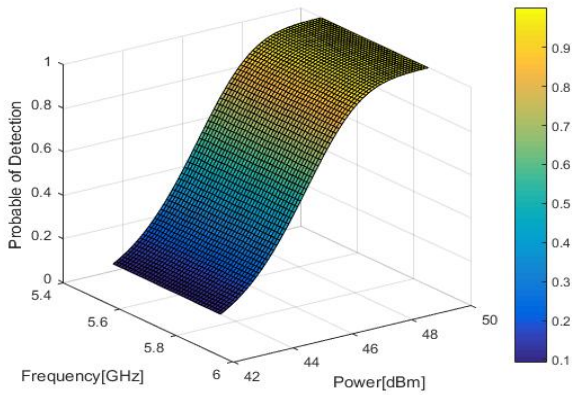


그림 2. 송신 출력과 주파수에 따른 탐지확률
Fig. 2. Detection probability due to transmitted power and frequency

표 2는 본 논문에서 사용할 안테나의 파라미터를 나타낸다. 실제 장비 성능이 공개되어있지 않아 기존의 대포병탐지레이다 관련 논문에서 사용된 레이더 파라미터를 사용하였다[18][19]. 목표 탐지확률은 85%로, 미국 AN/TPQ-53 대포병탐지레이다 운용시험에서 사용한 목표치와 동일하게 설정하였다[20].

표 2. 대포병탐지레이다 파라미터
Table 2. Counter-battery radar parameter

Parameters	Condition
G	35 dB
A_e	3.25 m^2
k	1.38×10^{-23}
T_0	290 K
P_D	85 %
F	5 dB
R	20km, 26.5km
P_{fa}	10^{-6}
frequency	5.47 ~ 5.85 GHz

국산화 장비인 대포병탐지레이다-II는 C 대역의 주파수를 운용한다. C 대역 주파수는 4GHz에서 8GHz의 범위로 정의되며, 국제전기통신연합(ITU)의 전파규칙에서 규정한 주파수 분배표와 국내 전파법 시행령의 주파수 분배도표에 의해 세부적인 사용기준이 제시되어 있다[21]. 이를 바탕으로 본 논문에서 사용할 주파수의 대역은 대포병탐지레이다의 사용기준에 해당하는 무선탐지(Radio location service) 대역으로 선정하였으며, 항공탐재 레이더 및 비콘

용, 공업 및 과학용, 의료용 등의 특정 제약조건이 없이 사용할 수 있는 대역인 5.47GHz ~ 5.85GHz로 선정하였다.

3.4 탐지 시뮬레이션 환경

그림 3은 본 논문에서 설정한 탐지 시나리오를 나타낸다. 그림 3(a)에서 탐지거리는 최초 북한군의 공격준비사격과 한국군 공격준비파괴사격의 시나리오를 고려하여 선정하였다. 북한군의 전선을 북방한계선으로, 한국군의 전선을 남방한계선으로 선정하고 각 전선 사이에 4km 너비의 비무장지대(DMZ; Demilitarized Zone)를 고려하였으며, 탐지 전 포탄의 실제 비행거리는 무시하는 것으로 가정하였다. 북방한계선으로부터 이격거리는 사단 포병은 5~7km 이격되어있음을 고려하여 평균인 6km로 정하였으며 [10], 대포병탐지레이다는 전선 후방 8~12km 후방에 전개함을 고려하여 남방한계선 기준 10km 후방으로 정하였다[22]. 이를 통해 모든 포탄에 대한 공통적인 사거리 20km를 파라미터로 선정하였으며, 추가로 군단급 포병에 대해서는 전선으로부터의 이격거리 10~15km를 고려하여 26.5km의 파라미터를 추가로 선정하였다.

그림 3(b)에서 고각 θ 는 투발 장비의 최대 고각을 고려하였으며, 북한군 포탄의 경우 0~75°, 방사포탄은 0~50°의 범위에서 1° 간격마다 RCS를 측정하였다. 한국군 포탄의 RCS의 경우 포탄의 하강 시점에서 탐지되므로 200~250°의 범위에서 1°간격마다 측정하였다. 방위각 ϕ 의 경우 모든 포탄에 대해서 0~60°의 범위에서 10°간격으로 RCS 데이터를 획득하였다.

그림 4는 FEKO 시뮬레이션에서 122mm OF-472에 대한 레이더 실험 환경이다. 사용하는 대포병탐지레이다는 모노스태틱 레이더이며, 표적의 거리를 고려하여 방사하는 빔을 Far Field의 평면파로 하였다. 포탄이 비행하면서 그리는 탄도의 궤적은 무게중심(Center of gravity)을 통해 그려진다. 본 논문에서는 포탄의 무게중심을 포탄의 바닥면으로부터 1/3 지점으로 선정하였으며, 각 포탄의 무게중심을 FEKO 시뮬레이션의 좌표계 중심으로 설정하였다.

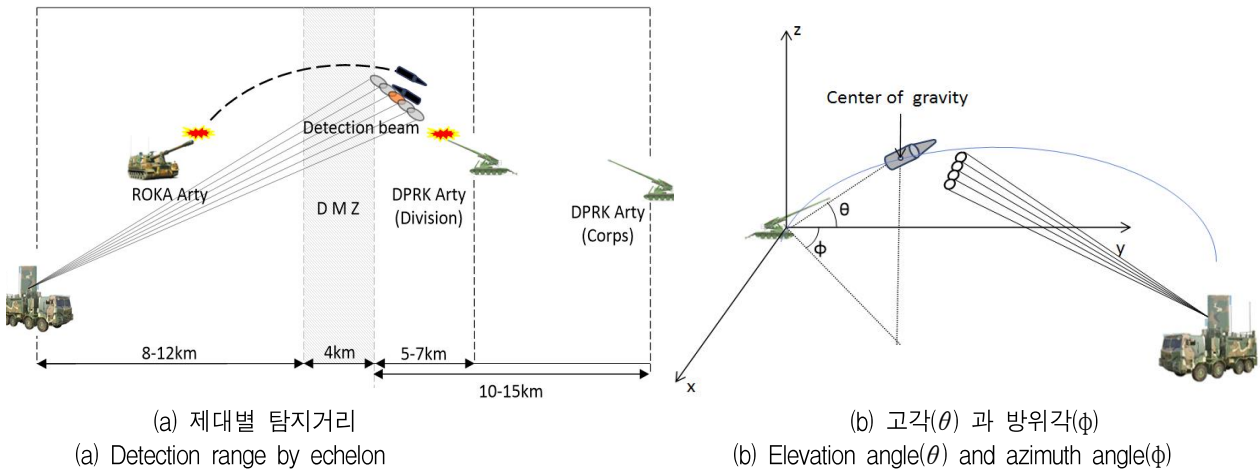


그림 3. 대포병탐지레이다 탐지 시나리오
Fig. 3. Counter-battery Radar detection scenario

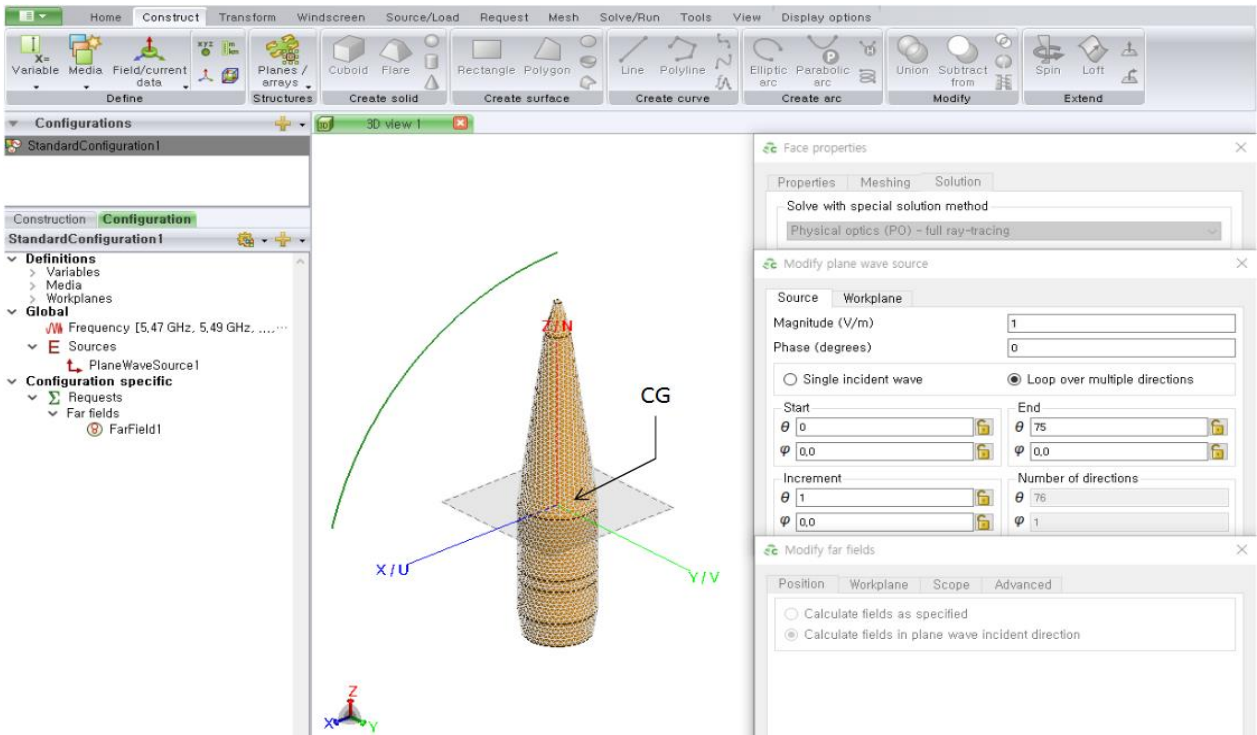


그림 4 FEKO를 이용한 레이더 실험 환경
Fig. 4 Radar test environment by FEKO

IV. 시뮬레이션 및 결과 분석

포탄별 RCS 해석은 5.47GHz에서 5.85GHz까지의 주파수를 선정한 방위각과 고각에 대해 20MHz 간격으로 시뮬레이션을 시행한 후, 스플라인 보간을 통하여 10MHz 간격으로 계산하였으며 m^2 단위로 나타내었다. 해석된 RCS값들은 구경별로 주파수에 따라 나타내었으며, 계산된 수치를 모두 포함할 수

있도록 평균값을 대푯값으로 선정하였다[23].

그림 5는 주파수에 따라 탄종별로 추출된 RCS 데이터의 평균을 오름차순 순위로 나타낸다. 그림 6은 그림 5에서 나타낸 주파수별 평균 RCS를 막대 그래프로 나타내었으며, 보는 바와 같이 주파수에 따른 평균 RCS는 5.51GHz에서 $0.01153m^2$ 로 가장 크게, 5.84GHz에서 $0.01144m^2$ 로 가장 작게 측정되는 것을 확인하였다.

Freq[GHz]	122mmARTL	130mmARTL	152mmARTL	170mmARTL	107mmRL	122mmRL	240mmARTL	155mmARTL	Average	Rank
5.47	6.7435E-03	8.5254E-03	1.8156E-02	2.9681E-02	5.7068E-03	3.9837E-03	1.3087E-02	6.1536E-03	1.1504E-02	12
5.48	6.7459E-03	8.5289E-03	1.8163E-02	2.9678E-02	5.7260E-03	4.0331E-03	1.3066E-02	6.1546E-03	1.1512E-02	9
5.49	6.7481E-03	8.5322E-03	1.8170E-02	2.9676E-02	5.7388E-03	4.1080E-03	1.3046E-02	6.1551E-03	1.1522E-02	4
5.5	6.7503E-03	8.5353E-03	1.8177E-02	2.9673E-02	5.7454E-03	4.1780E-03	1.3028E-02	6.1552E-03	1.1530E-02	3
5.51	6.7525E-03	8.5382E-03	1.8183E-02	2.9670E-02	5.7459E-03	4.2132E-03	1.3015E-02	6.1548E-03	1.1534E-02	1
5.52	6.7546E-03	8.5407E-03	1.8189E-02	2.9668E-02	5.7406E-03	4.1903E-03	1.3007E-02	6.1539E-03	1.1530E-02	2
5.53	6.7566E-03	8.5429E-03	1.8196E-02	2.9665E-02	5.7304E-03	4.1144E-03	1.3004E-02	6.1527E-03	1.1520E-02	6
5.54	6.7586E-03	8.5447E-03	1.8202E-02	2.9663E-02	5.7162E-03	4.0092E-03	1.3007E-02	6.1512E-03	1.1506E-02	11
5.55	6.7605E-03	8.5462E-03	1.8208E-02	2.9660E-02	5.6999E-03	3.9445E-03	1.3012E-02	6.1493E-03	1.1498E-02	17
5.56	6.7625E-03	8.5474E-03	1.8214E-02	2.9658E-02	5.6811E-03	3.9774E-03	1.3017E-02	6.1473E-03	1.1501E-02	14
5.57	6.7644E-03	8.5488E-03	1.8221E-02	2.9655E-02	5.6629E-03	4.0667E-03	1.3018E-02	6.1450E-03	1.1504E-02	10
5.58	6.7664E-03	8.5488E-03	1.8227E-02	2.9655E-02	5.6462E-03	4.1517E-03	1.3013E-02	6.1427E-03	1.1519E-02	7
5.59	6.7684E-03	8.5491E-03	1.8233E-02	2.9653E-02	5.6320E-03	4.1899E-03	1.3000E-02	6.1404E-03	1.1521E-02	5
5.6	6.7704E-03	8.5491E-03	1.8238E-02	2.9652E-02	5.6215E-03	4.1616E-03	1.2977E-02	6.1380E-03	1.1514E-02	8
5.61	6.7724E-03	8.5488E-03	1.8244E-02	2.9650E-02	5.6154E-03	4.1212E-03	1.2972E-02	6.1358E-03	1.1504E-02	13
5.62	6.7745E-03	8.5484E-03	1.8249E-02	2.9650E-02	5.6139E-03	4.1218E-03	1.2911E-02	6.1338E-03	1.1500E-02	15
5.63	6.7767E-03	8.5479E-03	1.8254E-02	2.9650E-02	5.6173E-03	4.1381E-03	1.2871E-02	6.1319E-03	1.1498E-02	16
5.64	6.7789E-03	8.5472E-03	1.8258E-02	2.9650E-02	5.6252E-03	4.1333E-03	1.2832E-02	6.1303E-03	1.1494E-02	18
5.65	6.7812E-03	8.5464E-03	1.8261E-02	2.9650E-02	5.6369E-03	4.1001E-03	1.2797E-02	6.1289E-03	1.1488E-02	24
5.66	6.7835E-03	8.5456E-03	1.8265E-02	2.9651E-02	5.6518E-03	4.0485E-03	1.2767E-02	6.1278E-03	1.1480E-02	28
5.67	6.7858E-03	8.5446E-03	1.8267E-02	2.9652E-02	5.6686E-03	4.0257E-03	1.2744E-02	6.1270E-03	1.1477E-02	29
5.68	6.7882E-03	8.5437E-03	1.8269E-02	2.9653E-02	5.6862E-03	4.0673E-03	1.2727E-02	6.1265E-03	1.1483E-02	27
5.69	6.7907E-03	8.5427E-03	1.8270E-02	2.9655E-02	5.7034E-03	4.1243E-03	1.2713E-02	6.1262E-03	1.1491E-02	21
5.7	6.7931E-03	8.5417E-03	1.8271E-02	2.9657E-02	5.7189E-03	4.1418E-03	1.2701E-02	6.1261E-03	1.1494E-02	19
5.71	6.7955E-03	8.5406E-03	1.8271E-02	2.9659E-02	5.7316E-03	4.1258E-03	1.2686E-02	6.1263E-03	1.1492E-02	20
5.72	6.7980E-03	8.5395E-03	1.8272E-02	2.9661E-02	5.7408E-03	4.1004E-03	1.2667E-02	6.1265E-03	1.1488E-02	23
5.73	6.8004E-03	8.5385E-03	1.8272E-02	2.9664E-02	5.7458E-03	4.1008E-03	1.2642E-02	6.1268E-03	1.1486E-02	26
5.74	6.8027E-03	8.5374E-03	1.8272E-02	2.9667E-02	5.7462E-03	4.1450E-03	1.2610E-02	6.1272E-03	1.1488E-02	22
5.75	6.8050E-03	8.5363E-03	1.8273E-02	2.9670E-02	5.7422E-03	4.1734E-03	1.2572E-02	6.1275E-03	1.1487E-02	25
5.76	6.8073E-03	8.5352E-03	1.8274E-02	2.9674E-02	5.7339E-03	4.1306E-03	1.2531E-02	6.1278E-03	1.1477E-02	30
5.77	6.8095E-03	8.5340E-03	1.8276E-02	2.9677E-02	5.7221E-03	4.0565E-03	1.2490E-02	6.1280E-03	1.1462E-02	31
5.78	6.8116E-03	8.5329E-03	1.8279E-02	2.9681E-02	5.7075E-03	4.0082E-03	1.2451E-02	6.1280E-03	1.1450E-02	35
5.79	6.8137E-03	8.5318E-03	1.8283E-02	2.9685E-02	5.6913E-03	4.0173E-03	1.2418E-02	6.1278E-03	1.1446E-02	38
5.8	6.8157E-03	8.5308E-03	1.8287E-02	2.9689E-02	5.6746E-03	4.0899E-03	1.2392E-02	6.1274E-03	1.1451E-02	34
5.81	6.8176E-03	8.5297E-03	1.8293E-02	2.9694E-02	5.6585E-03	4.1548E-03	1.2373E-02	6.1267E-03	1.1456E-02	32
5.82	6.8196E-03	8.5288E-03	1.8300E-02	2.9696E-02	5.6442E-03	4.1467E-03	1.2361E-02	6.1258E-03	1.1453E-02	33
5.83	6.8215E-03	8.5279E-03	1.8307E-02	2.9703E-02	5.6327E-03	4.0990E-03	1.2354E-02	6.1246E-03	1.1446E-02	37
5.84	6.8234E-03	8.5272E-03	1.8316E-02	2.9706E-02	5.6249E-03	4.0701E-03	1.2349E-02	6.1231E-03	1.1443E-02	39
5.85	6.8253E-03	8.5266E-03	1.8326E-02	2.9713E-02	5.6216E-03	4.1183E-03	1.2344E-02	6.1214E-03	1.1449E-02	36

그림 5. 추출 데이터
Fig. 5. Extracted data

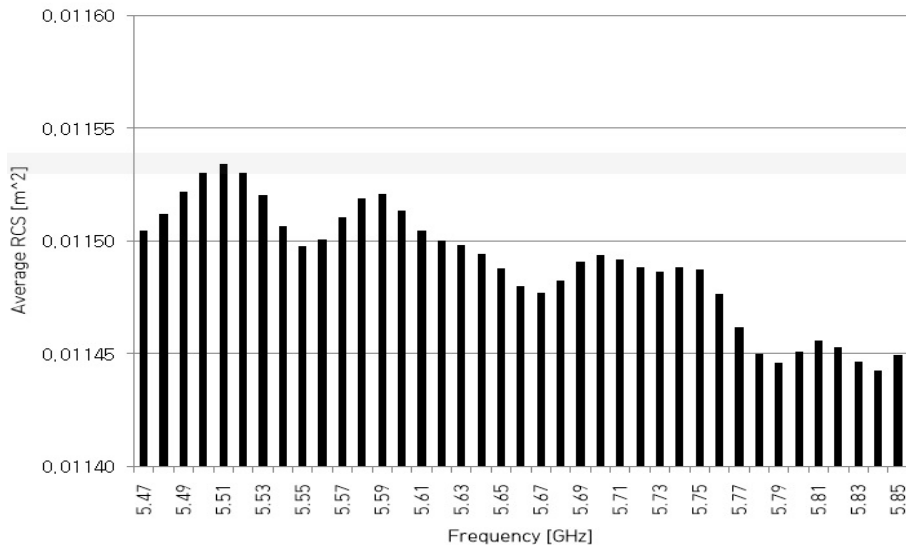


그림 6. 탐지거리 20km에서의 주파수별 평균 RCS
Fig. 6. Average RCS by frequencies at detection range of 20km

그림 7은 탐지확률 85%를 달성하기 위한 송신 출력을 식 (1), 식 (2), 식 (3)을 통해 나타낸 그래프이다. 그래프에서 5.51GHz에서의 송신 출력은 47.16dBm(51.999kW)으로, 5.84GHz에서의 송신 출력 47.2dBm(52.481kW)에 비하여 0.92% 감소하였다.

탐지거리 26.5km에서 탐지되는 표적은 북한 군단급 제대에서 운용하는 130mm 포탄, 170mm 포탄 그리고 240mm 방사포탄 3종이다. 이 3종의 탄에 대한 RCS의 평균을 구하였다.

그림 8은 이 3종류의 탄에 대한 평균 RCS를 나타내었다. RCS의 평균은 5.47GHz에서 $0.01709m^2$ 로 가장 크게, 5.85GHz에서 $0.01686m^2$ 로 가장 작게 나오는 것을 알 수 있다.

그림 9는 26.5km에서 85%의 탐지확률을 달성하기 위한 송신 출력을 나타내며, 5.47GHz에서는 50.34dBm(108.143kW)로, 5.85GHz에서의 송신 출력 50.4dBm(109.647kW)에 비해 1.38% 감소하였다

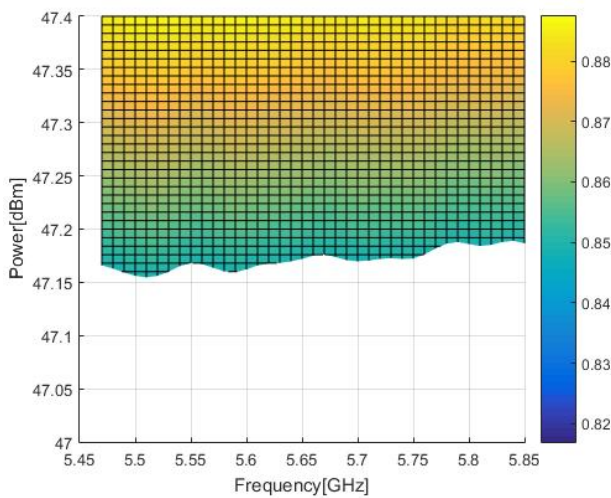


그림 7. 탐지거리 20km에서의 주파수별 송신 출력
Fig. 7. Transmitted power by frequencies at detection range of 20km

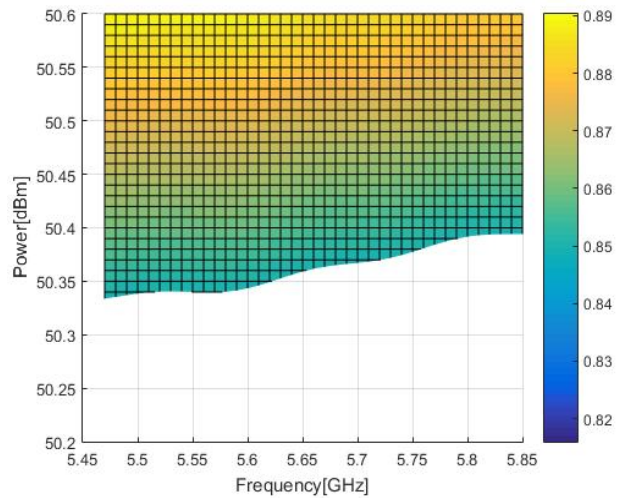


그림 9. 탐지거리 26.5km에서의 군단급 표적 송신 출력
Fig. 9. Transmitted power of corps-level artillery at detection range of 26.5km

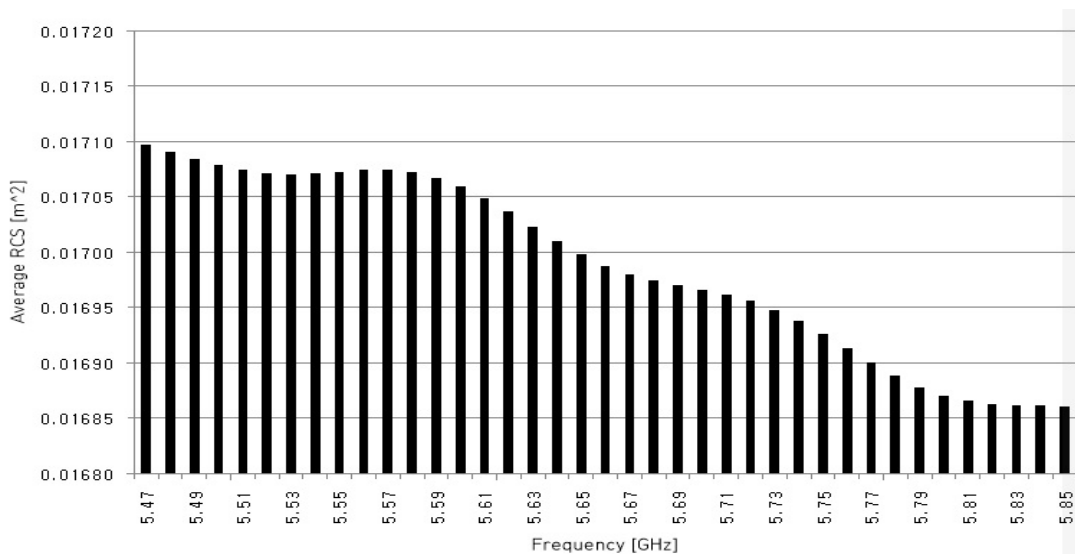


그림 8. 탐지거리 26.5km에서의 군단급 표적 평균 RCS
Fig. 8. Average RCS of corps-level artillery at detection range of 26.5km

V. 결 론

본 논문에서는 한반도 전장에서 대포병탐지레이다 운용시 탐지할 대상을 특정하고, 탐지대상을 실제 제원을 통해 PO기법으로 모델링하였다. 또한 실제 레이다 운용이 예상되는 주파수 대역을 포함하여 파라미터를 선정하여 이를 바탕으로 표적을 탐지하기 위한 최적의 주파수를 군단과 사단 제대별로 확인하였다.

탐지거리 20km에서 탐지되는 군단 및 사단급 표적은 5.51GHz에서 RCS는 $0.01153m^2$ 로 가장 크게, 85%의 탐지확률을 달성하기 위한 송신 출력은 47.16dBm(51.999kW)로 가장 작게 나타났다. 탐지거리 26.5km에서 탐지되는 군단급 표적은 5.47GHz에서 $0.01709m^2$ 로 가장 크게, 85%의 탐지확률을 달성하기 위한 송신 출력은 50.34dBm (108.143kW)로 가장 작게 나타났다. 이를 통해 선정된 주파수에서 감소된 송신 출력으로도 동일한 탐지 확률을 달성할 수 있음을 확인하였으며, 포탄의 탐지율을 높이기 위해 실제 레이다에서 운용할 주파수에서의 우선순위를 선정하는 데에 도움을 줄 수 있을 것이다.

본 연구에서 선정된 8종류의 포탄 외에도 다양한 탄종에 대한 분석을 수행하거나, 실제 레이다의 제원을 사용하여 더욱 정확한 결과를 도출할 수 있다. 또한 전장 환경에서 나타날 다양한 변수들을 고려할 수 있으며, 마지막으로 C 대역 외에 다양한 대역의 비교를 통한 적정 대역 선정에 관한 연구를 진행할 수 있다.

References

- [1] C. G. Lee, "North Korea's military power and military strategy : Threat status and countermeasures", Korea Economic Research Institute, pp. 135-173, Jan. 2012.
- [2] Y. G. Park, S. H. Park, and J. B. Park, "Introduction of domestic and global development status of counter-battery radar and presentation of future development direction of counter-battery radar", Defense & Technology, No. 507, pp. 76-85, May 2021.
- [3] Y. K. Kwak, "Radar system engineering 2nd Edition", Gyomoonsa, pp. 244, Nov. 2020.
- [4] H. Y. Lim, T. W. Lee, and D. W. Yoon, "Performance Analysis of Variable Frequency Radar with Optimal Frequency for RCS", The Journal of Korean Institute of Information Technology, Vol. 15, No. 1, pp. 93-106, Jan. 2017. <http://dx.doi.org/10.14801/jkiit.2017.15.1.93>.
- [5] : S. H. Im, S. J. Lee, I. S. Choi, and T. S. Lee, "A Study on Calculation and Comparison for VHF, UHF, L-Band RCS", The Journal of Korean Institute of Informaton Technology, Vol 14, No. 5, pp. 59-66, May 2016. <http://dx.doi.org/10.14801/jkiit.2016.14.5.59>.
- [6] C. Kenyon and T. Doragu, "Numerical Computation of the Radar Cross Section of Rockets and Artillery Rounds", US Army Research Laboratory, pp. 6-20, Sep. 2015.
- [7] C. Kenyon and T. Doragu, "Study of the Bistatic Radar Cross Section of a 155-mm Artillery Round", US Army Research Laboratory, pp. 5-11, Jun. 2017.
- [8] T. Y. Park and J. S. Lim, "Method on Radar deployment for Ballistic Missile Detection Probability Improvement", Journal ournal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering, Vol. 20, No. 3, pp. 669-676, Mar. 2016. <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2016.20.3>.
- [9] B. J. Yang, D. G. Song, Y. S. Kang, J. H. Jo, S. E. Je, B. K. Kim, and R. S. Myong, "An Optimal Aerodynamic and RCS Design of a Cruise Missile", J. Korean Soc. Aeronaut, Space Sci, Vol. 47, No. 7, pp. 479-488, 2019. <https://doi.org/10.5139/JKSAS.2019.47.7.479>.
- [10] Headquarters, Department of the Army, "ATP 7-100.2 North Korean Tactics", Department of the Army, Jul. 2020.
- [11] Barnett, D. Sean, Yvonne K. Crane, Gian Gentile, Timothy M. Bonds, Dan Madden, and

Katherine Pfrommer, "North Korean Conventional Artillery: A Means to Retaliate, Coerce, Deter, or Terrorize Populations", RAND Corporation, pp. 8-17, 2020.

[12] Christopher F. Foss, "Jane's Armour and Artillery 2001-2002", Janes Information Group, pp. 599-831, Aug. 2001.

[13] I. Hogg, "German Artillery of World War II", Greenhill Books, pp. 91-92, Mar. 2002.

[14] S. W. Choi and S. Y. Boo, "Computation of Radar Cross Section of Ship's Structure using a Physical Optics Method", Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 37, No. 4, pp. 82-91, Nov. 2000.

[15] M. A. Zaman and Md. A. Matin, "Radar Cross-Section Formulation of a Shell-Shaped Projectile Using Modified PO Analysis", Modelling and Simulation in Engineering, Vol. 2012, No. 20, pp. 20, Jan. 2012. <https://doi.org/10.1155/2012/328321>.

[16] Altair.com, "Altair FEKO User Guide", Altair, pp.1348 Jan. 2021.

[17] Bassem R. Mahafza, "Radar Systems Analysis and Design using MATLAB", 3rd ed., CRC Press, 2012.

[18] K. H. Kim, H. Kim, D. Y. Kim and H. S. JIn, "Development of Planar Active Phased Array Antenna for Detecting and Tracking Radar", The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, Vol. 29, No. 12, pp. 924-934, Dec. 2018. <http://dx.doi.org/10.5515/KJKIEES.2018.29.12.924>.

[19] Jim P. Y. Lee, "Interception of LPI Radar Signals", Defense Research Establishment Ottawa, pp. 12-17, Nov. 1991.

[20] J. M. Gilmore, "Operational Test and Evaluation AN/TPQ-53 (Q-53) Counterfire Radar Initial Operational Test and Evaluation Report", DOT&E, pp. 18, Oct. 2015.

[21] Ministry of Government Legislation,

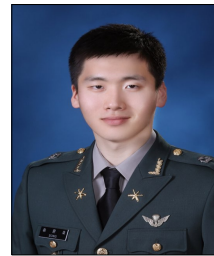
<https://www.law.go.kr/LSW/admRulLsInfoP.do?admRulSeq=2100000205195>. [accessed : Apr. 05, 2022]

[22] Headquarters, Department of the Army, "ATP 3-09.12 Field Artillery Counterfire and Weapons Locating Radar Operations", Department of the Army, pp. H-4, Oct. 2021.

[23] M. Meller, "On Bayesian Tracking and Prediction of Radar Cross Section", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 55, No. 4, pp. 1756-1768, Aug. 2019. <https://doi.org/10.1109/TAES.2018.2875572>.

저자소개

송 윤 호 (Younho Song)



2015년 2월 : 육군사관학교
전자공학과(공학사)
2021년 1월 ~ 현재 : 국방대학교
국방과학학과 무기체계전공
석사과정
관심분야 : 표적탐지 및 추적,
RCS해석

하 용 훈 (Yonghoon Ha)



1994년 2월 : 해군사관학교
해양학과(이학사)
1997년 2월 : 서울대학교
해양학과(이학사)
2000년 12월 : 미국 해군대학원
공학음향학(공학석사)
2009년 2월 : 서울대학교
조선해양공학(공학박사)
2019년 3월 ~ 현재 : 국방대학교 국방과학학과
무기체계전공 교수
관심분야 : 감시정찰무기체계, 표적탐지 및 추적,
수중음향 및 대잠전 관련 M&S