

Ku- 및 Ka-Band 기반의 대공 탐색 레이더 효과도 분석

Performance Analysis of Ku- and Ka-Band Based Air Defense Systems

김민 · 김홍락* · 주지한* · 권준범* · 우선걸* · 김경태

Min Kim · Hong-Rak Kim* · Ji-Han Joo* · Jun-Beom Kwon* · Seon-Keol Woo* · Kyung-Tae Kim

요 약

중 및 단거리 로켓포 포탄을 요격하기 위한 미사일을 개발하기 위하여, 공대공 탐색 레이더의 효과도 분석이 선행되어야 한다. 효과도 분석을 위해 Ku- 및 Ka-band 기반 탐색 레이더에 대한 교전 시뮬레이션을 수행한다. 실제 환경과 유사한 시뮬레이션을 위하여 모노펄스 레이더 기반의 탐색 레이더 시스템 모델링, 수신 신호 모델링, 실제 포탄을 기반으로 제작된 CAD(computer aided design) 모델의 레이더 반사 단면적(radar cross section, RCS) 수치해석, 적 탄두 및 요격 미사일의 궤적 모델링을 수행한다. 여기서, 빔폭 및 수신 신호의 세기 등에 대한 영향 분석을 위하여 스월링(Swerling) 모델 및 앞서 분석된 RCS 결과를 이용한 시뮬레이션 수행되었다. 비교 분석 결과, Ka-band 기반 탐색 레이더는 다수의 표적이 존재하는 상황에서 표적 추적 성능이 우수하였지만, 저피탐 표적에 대해서는 Ku-band의 경우가 표적을 보다 효과적으로 탐지 할 수 있음을 확인하였다.

Abstract

To develop missiles to intercept short and medium-range rockets, the effectiveness of the air-to-air radar detector should be analyzed. In this study, to analyze the performance of a Ku- and Ka-band-based detector, we model the monopulse radar system, radar echo, and trajectories of the missile and rocket and perform numerical analysis for the radar cross section (RCS) of a computer aided design (CAD) model that is constructed based on an actual rocket. In addition, both the Swerling model and the analyzed RCS are considered in simulation to analyze the effect of the beam width of the monopulse radar and the power of received signals. As a result of the simulation, the Ka-band radar tracked the target relatively accurately in the presence of multiple targets, whereas the Ku-band radar had a higher probability of detection for low-RCS targets.

Key words: Amplitude Comparison Monopulse Radar, Radar Cross Section (RCS), Tracking Radar, Medium-Range Rocket

I. 서 론

최근 이스라엘 라파엘사(社)와 이스라엘 항공 우주 산업에서 개발한 이동식 방공 시스템인 아이언돔(Iron Dome)

이 많은 관심을 받고 있다. 이스라엘의 아이언돔은 근접 거리에서부터 최대 70 km 거리에서 발사된 단거리 로켓포와 155 mm 포탄을 요격한다. 한편, 한반도 휴전선 후방에 배치된 1,000여문의 북한 장사정포는 국가안보에 심각

「이 연구는 LIG 넥스원 연구비의 지원으로 연구되었음.」

포항공과대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Pohang University of Science and Technology)

*LIG넥스원(LIGNex1)

· Manuscript received December 17, 2021 ; Revised December 27, 2021 ; Accepted January 7, 2022. (ID No. 20211217-114)

· Corresponding Author: Kyung-Tae Kim (e-mail: kkt@postech.ac.kr)

한 위협이 되고 있으며, 현재 한국형 아이언돔의 필요성이 대두되고 있다.

아이언돔은 그림 1과 같이 지대공 레이더를 이용하여 다수의 포탄을 탐지 및 추적 후 궤적을 예측하여 요격 임무를 수행한다. 예측된 궤적으로 발사된 요격 미사일은 적 포탄과 인접한 거리에서 미사일에 장착된 탐색 레이더로 직접 방위 및 거리를 탐지하여 적 포탄을 추적한다. 일반적인 요격 미사일들은 모노펄스 추적방식의 레이더를 이용하여 적 탄두의 각도 및 거리를 탐지 및 추적한다. 모노펄스 추적방식은 두 개 이상의 안테나에서 수신된 신호의 진폭 또는 위상을 비교하여 표적의 방향을 효율적이고 정확하게 추정한다. 하지만, 모노펄스 레이더의 빔폭 내 많은 수의 포탄이 존재하는 상황 및 적 포탄의 저 RCS(radar cross section) 특성은 추적 성능 저하의 원인이 될 수 있다^{[1][2]}. 이에 따라서, 교전 시나리오 내에서 주파수에 따른 모노펄스 레이더의 특성 분석을 바탕으로 다수의 포탄 탐지 및 추적, 궤적 예측의 효과도 분석은 한국형 아이언돔 개발에 초석이 될 수 있다.

높은 고도에서 비행 중인 표적에 대한 추적 성능은 탐색 레이더의 운용 주파수가 높을수록 향상된다^[3]. 반면, 50 GHz 이상의 주파수 대역에서는 대기 손실률이 매우 증가하기 때문에, 장거리 표적의 탐지에는 50 GHz 이상의 주파수는 적합하지 않다. 따라서, 모노펄스 추적방식을 사용하는 국내 요격 미사일은 대표적으로 Ku-, Ka-band 탐색 레이더를 기반으로 하며, 본 논문에서는 Ku-, Ka-band를 사용한 모노펄스 탐색 레이더의 모델링 및 시

뮬레이션을 구성한다. 먼저, Ku-, Ka-band 레이더 시스템 모델링 및 송신 빔포밍을 통하여 모노펄스 탐색 레이더 모델링을 수행한다. 또한, 실제 교전과 유사한 결과를 얻을 수 있도록 적 로켓 탄두의 CAD(computer aided design) 모형을 구성하여 각 주파수 대역에 따라서 RCS 분석을 수행하며, 적 포탄 및 아군의 요격 미사일의 궤적 모델링 또한 수행한다. 최종적으로, 교전 시뮬레이션을 통한 각 Ku- 및 Ka-band 레이더 시스템의 추적 결과에 대한 비교 분석을 수행한다.

II. 교전 시뮬레이션 모델 구축

2-1 Ku/Ka-Band 레이더 송신 빔포밍

모노펄스 레이더 시스템의 안테나는 평면 배열 안테나(rectangular array antenna)로 가정하며, 안테나 빔 패턴(beam pattern)을 고려해야 한다. 이때, 평면 배열 안테나 구조는 2차원 평면상에서 안테나 소자들이 수직, 수평 축 각각에 대해 등 간격으로 배치된 형태를 의미한다^[1]. 평면 배열 패턴의 수학적 모델은 다음과 같이 정의된다.

$$AF(\theta, \phi) = \sum_{i=1}^{MN} w_i \left[e^{j \left(\frac{2\pi}{\lambda} (\psi_i - \psi_{0,i}) \right)} \right] \quad (1)$$

여기서

$$\begin{aligned} \psi_i &= x_i \sin \theta \cos \phi + y_i \sin \theta \sin \phi, \\ \psi_{0,i} &= x_i \sin \theta_0 \cos \phi_0 + y_i \sin \theta_0 \sin \phi_0, \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, ϕ 및 θ 는 각각 조향하고자 하는 방위각 및 고각; ϕ_0 및 θ_0 는 초기 조향 방위각 및 고각; M 및 N 은 각각 수직 및 수평 축의 안테나 소자 개수; x_i 및 y_i 는 각각 수직 및 수평 축의 인접한 소자 사이의 거리; w_i 는 급전 신호의 크기; λ 는 레이더 신호의 파장을 의미한다.

Ku-band 신호의 파장은 Ka-band 신호의 파장과 비교하여 약 2배 길기 때문에, 식 (1)을 통해 Ku-band 레이더 시스템의 빔 폭이 2배 더 넓게 형성되는 것을 계산할 수 있다. 그림 2는 Ku- 및 Ka-band에 대해 4×4 평면 배열 안테나를 가정하여 계산한 2차원 빔 패턴을 나타내며, Ku-band의 3 dB 빔폭이 Ka-band의 경우와 비교하여 2배 넓다는 것을 확인할 수 있다.

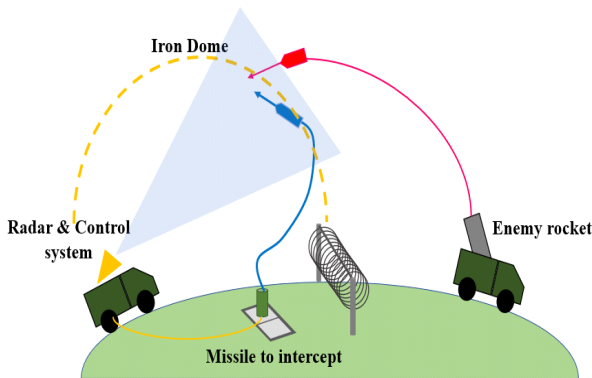
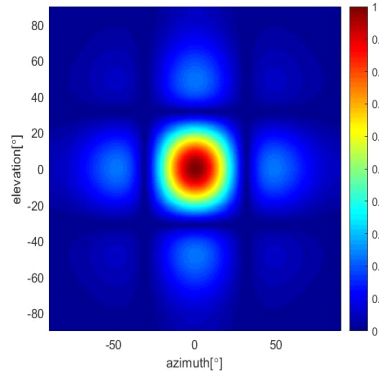
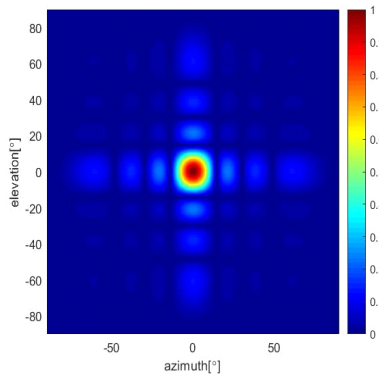


그림 1. 아이언돔 작동원리
Fig. 1. Iron Dome intercepting process.



(a) Ku-band



(b) Ka-band

그림 2. 2차원 송신 빔 패턴

Fig. 2. 2D beam pattern.

2-2 Ku/Ka-Band 레이더 시스템 모델링

모노펄스 레이더 시스템은 크게 진폭 비교 모노펄스 (amplitude-comparison monopulse: ACM) 및 위상 비교 모노펄스(phase-comparison monopulse: PCM) 레이더 시스템으로 나눌 수 있다. 본 논문에서는 ACM 레이더 시스템을 가정하여 추적 레이더 시스템을 모델링하였다.

ACM 기법을 이용하여 위협 표적의 방위각 및 고각 모두를 추정하기 위하여, 그림 3과 같이 4개 이상의 빔들을 동시에 송신하여야 한다^[1]. 각 송신 빔들은 서로 다른 방향으로 동일한 스캔트 각도(squint angle)만큼 기울어져 있기 때문에 위협 표적이 레이더의 가시선 (radar line of sight: RLOS) 방향에서 벗어나 있는 경우, 레이더 반사신호는 서로 다른 진폭으로 각 채널에 수신되며, 이것을 이용하여 표적의 방위각 및 고각을 추정할 수 있다^[4]. 먼저,

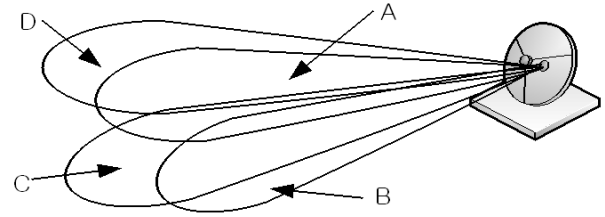


그림 3. 2차원 모노펄스 안테나 빔 패턴

Fig. 3. 2D beam pattern of monopulse antenna.

위상 기준을 설정하기 위하여 각 수신 채널의 신호들을 모두 더하여 합 패턴 $(A+B)+(C+D)$ 을 형성한다. 또한, 방위각 및 고각 추정을 위하여 차 패턴을 형성하여야 하며, 방위각 방향에 대한 차 패턴은 $(A+B)-(D+C)$; 고각 방향에 대한 차 패턴은 $(A+D)-(B+C)$ 를 통해 형성할 수 있다. 형성된 합 패턴과 각각의 차 패턴을 통해 방위각 및 고각에 대한 합-차 신호비를 형성한다. 이때, 합-차 신호비 및 추정 각도는 선형관계를 만족하며, 모노펄스 시스템에서는 빔패턴 및 스캔트 각도를 이용하여 선형적인 관계에 대한 기울기 정보를 사전에 계산할 수 있다^[4].

그림 4는 고안된 모노펄스 레이더 시스템의 신호 처리 과정을 나타낸다. 각 채널의 신호는 정합 필터(matched filtering) 과정을 거침으로써 SNR을 최대화 할 수 있으며^[5], CFAR(constant false alarm rate) 탐지기를 이용하여 위

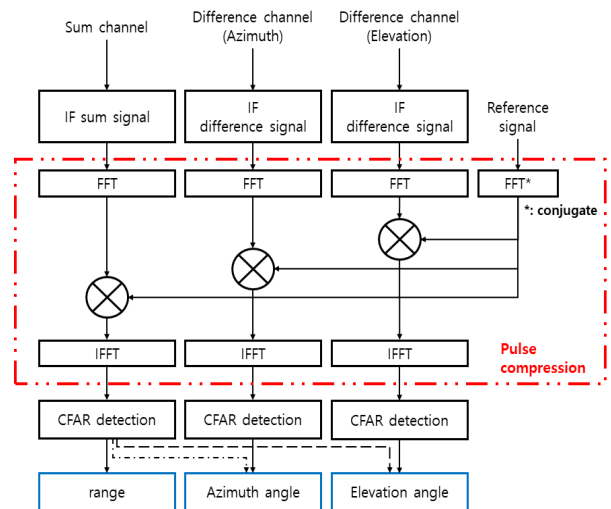


그림 4. 모노펄스 레이더 시스템의 신호처리 과정

Fig. 4. Signal processing for the devised monopulse radar system.

협 표적의 거리 정보를 추정할 수 있다^[2]. 또한, CFAR 탐지기에 탐지된 각 채널의 신호를 이용하여 합-차 신호비 계산을 통해 방위각 및 고각을 계산할 수 있다. 위협 표적에 대해 추정된 정보는 칼만필터 기반의 추적 알고리즘을 이용하여 표적의 속도 및 위치 등의 변화 예측에 사용된다.

2-3 Ku/Ka-Band 포탄 RCS 수치해석

표적에 의해 반사된 레이더 신호의 세기는 다음과 같이 표현할 수 있다^[2].

$$P_{re} = \frac{P_{tr} \lambda^2 \sigma G^2}{(4\pi)^3 R^4} \quad (3)$$

여기서 P_{tr} 는 송신 전력; λ 는 신호의 파장; G 는 안테나 이득; R 은 레이더 및 표적 사이의 거리 및 σ 는 표적의 RCS이다. 따라서 주파수에 따른 표적의 RCS 특성 변화를 고려한 시뮬레이션을 수행하기 위하여, 본 논문의 저자들은 그림 5와 같이 포탄의 직경 및 길이가 각각 500 mm 및 5,000 mm의 포탄 CAD 모델을 구성하였다. RCS 분석은 Ku- 및 Ka-band에 대하여 수행되어야 하므로, 고주파 수치해석 기법인 PO-PTD(physical optics and physical theory of diffraction)를 적용하여 RCS를 계산하였다^{[6],[7]}. Ku- 및 Ka-band의 레이더 시스템을 가정하여 분석을 수행하였으며, 편파는 수직-수직 편파(vertical-to-vertical polarization)를 이용하였다. 그림 6은 Ku- 및 Ka-band 각각의 중심주파수에서 방위각 방향으로 0~180°, 고각 방향으로 0~90°범위에 대하여 1°간격으로 분석된 RCS 결과를 나타낸다. 이때, 1° 이내의 각도에 대한 RCS는 인접한 RCS에 대하여 선형 보간(interpolation) 기법을 적용하여 시뮬레이션에 적용되었다. 전 방위에서 분석된 RCS 결과는 전반적으로 비슷하게 형성되는 것을 확인할 수 있다.

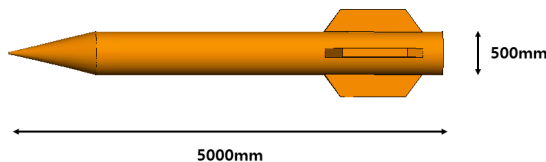


그림 5. 시뮬레이션을 위해 구성된 포탄 CAD 모델
Fig. 5. CAD model of missile for simulation.

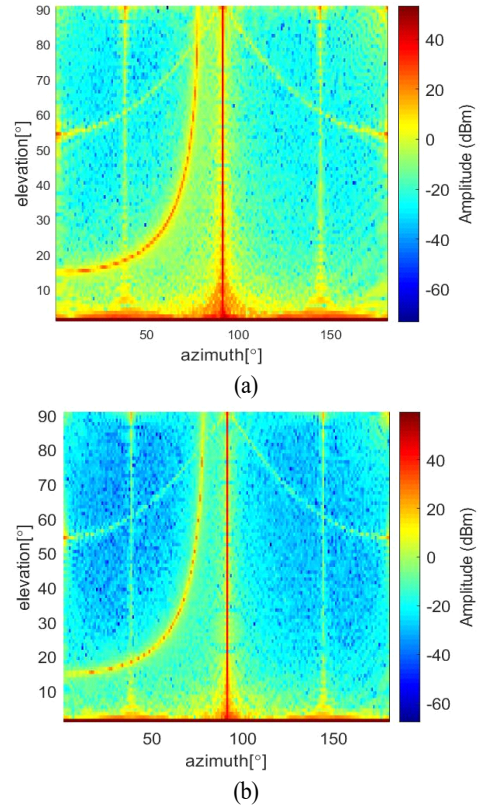


그림 6. (a) Ku- 및 (b) Ka-band에 대한 포탄의 방위각 및 고각에 따른 RCS

Fig. 6. RCS of missile according to azimuth and elevation angle in (a) Ku- and (b) Ka-band.

여기서 포탄 CAD 모델의 RCS는 각각의 주파수 대역에 걸쳐 분석되었기 때문에 푸리에 변환을 통하여 1차원 고해상도 거리 분해능(high resolution range profile: HRRP) 영상 또한 획득할 수 있다(그림 7). 본 시뮬레이션에서 각 주파수 대역에 따른 탐색 레이더는 표적에 반사된 레이더 신호를 수신하여 해당 HRRP를 생성 후 탐지한다.

2-4 포탄 및 요격 미사일 궤적 모델링

장사정포 등에서 발사된 포탄은 최초 추진력을 통해 발사된 후 중력(g), 양력(L) 및 항력(D_a)에 의해 포물선을 그리며 비행한다. 비교적 작은 면적의 포탄이 받는 양력(L)의 영향이 매우 작다고 가정할 경우, 데카르트 좌표계의 각 축에 대한 가속도는 다음과 같이 계산할 수 있다.

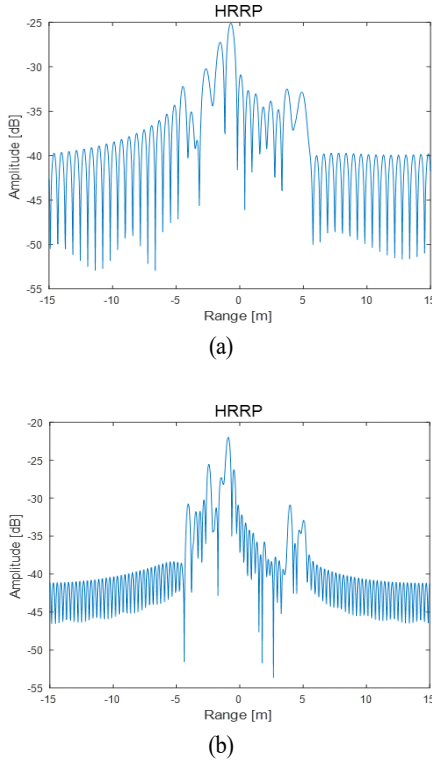


그림 7. (a) Ku- 및 (b) Ka-band 레이더 시스템에서 획득된 포탄의 HRRP (방위각: 60° , 고각: 90°)

Fig. 7. HRRP of missile generated by (a) Ku- and (b) Ka-band radar systems.

$$\begin{aligned}
 a_x &= \frac{D_a}{m} \cos\theta \cos\phi, \\
 a_y &= \frac{D_a}{m} \cos\theta \sin\phi, \\
 a_z &= -\left(\frac{D_a}{m} \sin\theta + g \right),
 \end{aligned} \quad (4)$$

여기서

$$D_a = \frac{1}{2} \rho A_f C_D V^2 = \frac{\pi C_D \rho V^2 d^2}{8} \quad (5)$$

여기서 ρ 는 고도에 따른 대기밀도; C_D 는 항력계수; V 는 포탄의 속도; A_f 는 유효면적; d 는 포탄의 직경 및 m 은 포탄의 질량을 의미한다.

반면, 요격 미사일의 경우, 일정한 시간 간격마다 모노 펄스 레이더 시스템으로부터 추정된 방위각 및 고각 만큼 자세각(방향) 조정이 요구된다. 이에 따라서, 요격 미

사일의 자세각에 따라서 결정되는 국부좌표계(local orthogonal coordinate(X_b, Y_b, Z_b)) 및 자세각에 무관한 전역좌표계(global orthogonal coordinate(X_e, Y_e, Z_e))를 정의하여 요격 미사일의 궤적 모델링을 수행한다[8]. 먼저, 전역좌표계 각 축에 대한 요격 미사일의 속도는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 U_e &= V_m \cos\Theta \cos\Phi \\
 V_e &= V_m \cos\Theta \sin\Phi \\
 W_e &= V_m \sin\Theta
 \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 V_m 은 요격 미사일의 속력; Θ 및 Φ 는 전역좌표계에서 요격 미사일 속도 벡터의 방위각 및 고각을 나타낸다. 그리고, 국부좌표계 및 전역좌표계 사이의 선형 변환 관계를 효율적으로 나타내기 위하여 다음과 같이 사원수(quaternion)를 정의한다.

$$\begin{aligned}
 A &= \left[s\left(\frac{\Phi}{2}\right) s\left(\frac{\Theta}{2}\right) c\left(\frac{\Psi}{2}\right) \right] - \left[c\left(\frac{\Phi}{2}\right) c\left(\frac{\Theta}{2}\right) s\left(\frac{\Psi}{2}\right) \right] \\
 B &= -\left[c\left(\frac{\Phi}{2}\right) s\left(\frac{\Theta}{2}\right) c\left(\frac{\Psi}{2}\right) \right] - \left[s\left(\frac{\Phi}{2}\right) c\left(\frac{\Theta}{2}\right) s\left(\frac{\Psi}{2}\right) \right] \\
 C &= -\left[s\left(\frac{\Phi}{2}\right) c\left(\frac{\Theta}{2}\right) c\left(\frac{\Psi}{2}\right) \right] + \left[c\left(\frac{\Phi}{2}\right) s\left(\frac{\Theta}{2}\right) s\left(\frac{\Psi}{2}\right) \right] \\
 D &= -\left[c\left(\frac{\Phi}{2}\right) c\left(\frac{\Theta}{2}\right) c\left(\frac{\Psi}{2}\right) \right] - \left[s\left(\frac{\Phi}{2}\right) s\left(\frac{\Theta}{2}\right) s\left(\frac{\Psi}{2}\right) \right]
 \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 $s(\cdot)$ 및 $c(\cdot)$ 는 \sin 및 \cos 함수 및 Ψ 는 요격 미사일이 이동 방향을 중심으로 회전된 각도, 즉 롤 각(roll angle)을 의미한다. 상기 정의된 사원수를 이용하여 국부 좌표계와 전역 좌표계 사이의 선형 변환 행렬, C_m 을 다음과 같이 형성할 수 있다.

$$C_m = \begin{bmatrix} C_m(1,1) & C_m(1,2) & C_m(1,3) \\ C_m(2,1) & C_m(2,2) & C_m(2,3) \\ C_m(3,1) & C_m(3,2) & C_m(3,3) \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서

$$\begin{aligned}
 C_m(1,1) &= A^2 - B^2 - C^2 + D^2, \\
 C_m(1,2) &= 2(AB - CD), \\
 C_m(1,3) &= 2(AC + BD), \\
 C_m(2,1) &= 2(AB + CD), \\
 C_m(2,2) &= -A^2 + B^2 - C^2 + D^2, \\
 C_m(2,3) &= 2(BC - AD), \\
 C_m(3,1) &= 2(AC - BD), \\
 C_m(3,2) &= 2(BC + AD), \\
 C_m(3,3) &= -A^2 - B^2 + C^2 + D^2
 \end{aligned} \quad (9)$$

계산된 변환행렬을 이용하여 전역좌표계의 미사일 속도를 국부좌표계 각 축의 속도 성분으로 변환할 수 있다.

$$[U_b \ V_b \ W_b]^T = C_m^T [U_e \ V_e \ W_e]^T \quad (10)$$

여기서 윗 첨자, T 는 전치(transpose) 연산자를 의미한다. 또한, 국부좌표계에서의 요격 미사일의 가속도는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} X_{ba} &= -D_a c(\alpha) + g C_m(3,1) + \phi V_b - \theta W_b \\ Y_{ba} &= g C_m(3,2) - \phi U_b \\ Z_{ba} &= -D_a s(\alpha) + g C_m(3,3) + \theta U_b \end{aligned} \quad (11)$$

최종적으로, 추정된 각도에 따라서 자세각이 조정된 전역좌표계에서 요격 미사일의 속도는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$[U_e \ V_e \ W_e]^T = [U_e \ V_e \ W_e]^T + (C_m [X_{ba} \ Y_{ba} \ Z_{ba}]^T) \Delta t \quad (12)$$

여기서 Δt 는 PRI(pulse repetition interval)를 의미한다.

Ⅲ. 시뮬레이션 결과

본 절에서는 Ku- 및 Ka-band 레이더 시스템 기반 요격 미사일이 인접한 거리에서 비행하는 다수의 적 포탄 중 원하는 포탄을 요격할 확률 및 성능 비교 분석을 목표로 한다. 이를 위하여, 앞서 모델링된 모노펄스 탐색 레이더, 적 포탄 및 요격 미사일의 궤적 등을 이용하여 교전 시뮬레이션을 수행한다. 상기 목적을 달성하기 위하여 요격 미사일의 탐색 레이더에 다수의 포탄이 탐지되는 시나리오를 가정한다. 먼저, 3개의 포탄은 $[-0.5, 0, 0]$ km를 기준으로 x 및 y 축 방향으로 ± 50 m, z 축 방향으로 30 m 내 임의의 위치에서 초기속도 $V_0=500$ m/s, 고각, $45 \leq \theta \leq 48$ 및 방위각, $-93 \leq \phi \leq -90$, 범위 내 방향으로 발사하였으며, 적 포탄이 y 축 방향으로 -10 km 지점을 지나는데, 아군 지상 레이더에 의해 탐지되었음을 가정하여 $[0, -7, 0]$ km의 위치에서 요격 미사일이 발사된다. 이때, 요격 미사일의 속도는 적 포탄 속도의 2배로 설정하였다. 요격 미사일의 모노펄스 탐지기는 포탄과의 거리가 5 km 이내로 근접한 경우에 작동됨을 가정하였다. Ku- 및 Ka-band 모노펄스 레이더 시스템의 세부 파라미터는 표 1과 같다. 또한, 시뮬레이션은 레이더 시스템의 빔폭 및 표적

의 RCS가 요격률에 미치는 영향 분석을 위하여 CAD 모델로부터 분석된 RCS 및 스윙링(Swerling) 모델^{2[2]}로부터 정의된 RCS에 대하여 각각 수행된다. 실험의 효율성을 위해 100번의 몬테카를로 시뮬레이션(monte-carlo simulation)을 수행하였다.

그림 8은 인접한 3개의 포탄 중 1번 포탄을 추적하여 요격하는 미사일의 궤적을 나타낸다. 그림 9는 1번 포탄을 추적하는 요격 미사일의 탐색 레이더가 추정된 표적의 방위각 및 고각, 탐색 레이더의 RLOS 기준에서 벗어나 있는 표적들의 방위각 및 고각을 나타낸다. 탐색 레이더 RLOS로부터 1번 표적이 벗어나는 경우, 1번 포탄이 탐색 레이더 RLOS 위로 정렬하기 위하여 요격 미사일의 자세각 조정이 수행되는 것을 그림 8 및 그림 9로부터 확인할 수 있다.

요격 미사일의 적 포탄에 대한 최종 도달 거리에 따라서 요격 성공 및 실패를 판단하였으며, 다양한 상황을 고려하기 위하여 최종 도달 거리 목표 값을 5 및 10 m로 설정하였다. 표 2는 1 m² 크기의 점 표적 및 스윙링 모델2를 가정하여 분석된 교전 시뮬레이션 결과를 나타낸다. Ka-

표 1. 모노펄스 레이더 시스템 파라미터

Table 1. Monopulse radar system parameters.

Frequency	Ku- and Ka band
Pulse width	4 μ s
PRF	1,024 Hz
Transmit power	50 dBm
Dynamic range of receiver	-80 ~ 40 dB
Antenna gain	30 dBi

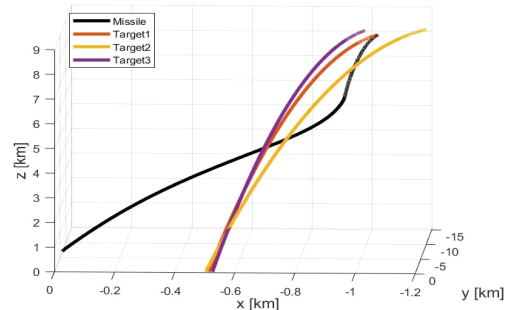
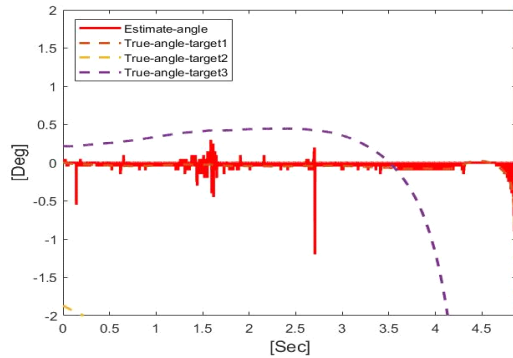
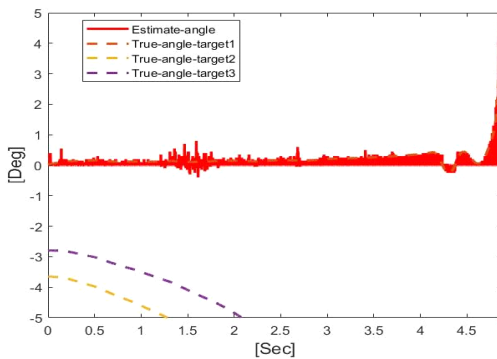


그림 8. 포탄 및 요격 미사일 궤적

Fig. 8. Missile and target trajectory.



(a)



(b)

그림 9. 모노펄스 레이더에 의해 추정된 각 표적의 (a) 방위각 및 (b) 고각

Fig. 9. (a) Azimuth, and (b) elevation of the target estimated by monopulse radar.

표 2. 스월링 모델2를 이용한 시뮬레이션 결과

Table 2. Simulation result using the Swerling model II.

Circular error probable (m)	Interception rate (%)		Selected target intercept rate (%)	
	5	10	5	10
Ku-band	80	84	77	80
Ka-band	92	92	90	90

band기반의 모노펄스 레이더 시스템의 요격률이 Ku-band의 경우보다 8 % 높으며, 초기에 목표한 표적을 요격할 확률 또한 10 % 더 높았으며, 목표 도달 거리가 5 m인 경우, Ku-band 기반의 시스템의 요격률이 감소하였다. Ka-band 레이더 시스템의 빔폭이 Ku-band의 경우 대비 절반

표 3. 수치해석 기반 RCS를 이용한 시뮬레이션 결과

Table 3. Simulation result using RCS calculated by numerical analysis.

Circular error probable (m)	Interception rate (%)		Selected target intercept rate (%)	
	5	10	5	10
Ku-band	81	84	72	75
Ka-band	76	76	56	56

이기 때문에, 상기 실험 결과는 인접한 표적들이 레이더 시스템에 동시에 탐지될 확률이 낮아진다는 것에 기인한다. 반면, 포탄의 CAD 모델로부터 분석된 RCS를 사용한 실험 결과(표 3)에 따르면 Ku-band 기반의 레이더 시스템이 Ka-band의 경우와 비교하여 더 높은 확률로 표적을 요격하였다. CAD 모델로부터 분석된 RCS의 크기는 방위각 및 고각의 특정 영역을 제외하고 대부분 매우 작은 값을 가지며, 식 (3)으로 부터 확인할 수 있듯이 레이더의 수신 신호의 세기는 파장에 비례하기 때문에 고주파 신호일수록 수신 신호의 세기는 작아진다. 따라서 Ka-band 레이더 시스템에서 수신 신호의 세기는 Ku-band의 경우보다 4배 작으므로 탐지가 어려운 상황이 더 높은 빈도로 발생한다.

IV. 결 론

본 논문에서는 교전 시뮬레이션을 통해 중, 단거리 로켓포를 요격하기 위한 요격 미사일의 탐색 레이더의 효과도 분석을 수행하였다. 실제 환경과 유사한 교전 시뮬레이션을 위하여 먼저, Ku- 및 Ka-band 기반의 레이더 시스템을 가정하여 빔포밍을 수행하였다. 또한, 주파수에 따른 탐지 및 추적 성능 분석을 위하여 경로 손실 및 대기 손실을 고려한 신호 모델링이 수행되었으며, 실제 단거리 로켓포의 탄두의 CAD 모델을 제작하여 주파수에 따른 방위각 및 고각 별 RCS 분석을 수행하였다. 마지막으로, 적 탄두의 궤적 모델링 및 매 시각 자세각 조정이 가능한 요격 미사일의 궤적 모델링을 수행하였다.

교전 시뮬레이션 결과, Ka-band 레이더 시스템은 좁은 빔폭을 이용하여 다수의 표적이 근거리에서 비행하는 상황에서도 Ku-band의 경우보다 약 10 % 이상의 확률로 표

적을 요격하였다. 하지만, 실제 상황을 고려하여 저피탐 특성을 갖는 포탄의 CAD 모델로부터 분석된 RCS를 이용한 실험 결과, Ka-band의 탐지율이 급격히 감소하였으며, 표적 요격률 또한, Ku-band의 경우와 비교하여 10 % 낮은 결과를 보였다.

References

- [1] S. M. Sherman, *Monopulse Principles and Techniques*, Dedham, MA, Artech House, 1984.
- [2] G. W. Stimson, *Introduction to Airborne Radar*, 3rd ed. Raleigh, NC, SciTech, 2014.
- [3] D. A. Nguyen, B. Cho, C. Seo, J. Park, and D. H. Lee, "Analysis of the optimal frequency band for a ballistic missile defense radar system," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 18, no. 4. pp. 231-241,

Oct. 2018.

- [4] M. Oommen, S. Lenin, M. S. Ansari, and S. Mishra, "An analysis of digital signal processing in monopulse radars," *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, vol. 3, no. 3, pp. 5665-5669, 2014.
- [5] V. C. Chen, *Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging*, Raleigh, NC, SciTech, 2014.
- [6] G. T. Ruck, D. E. Barrick, W. D. Stuart, and C. K. Krichbaum, *Radar Cross Section Handbook*, vols. 1 and 2, New York, NY, Plenum Press, 1970.
- [7] J. B. Keller, "Geometrical theory of diffractiontheory of diffraction," *Journal of the Optical Society of America*, vol. 52, no. 2, p. 116-130, Feb. 1962.
- [8] G. M. Siouris, *Missile Guidance and Control Systems*, New York, NY, Springer, 2003.

김 민 [포항공과대학교/공학박사]

<https://orcid.org/0000-0001-7520-3513>



2015년 2월: 부경대학교 전자공학과 (공학사)
2017년 2월: 부경대학교 전자공학과 (공학석사)
2017년 3월~2018년 7월: 포항공과대학교 전자전기공학과 연구원
2018년 9월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)

[주 관심분야] 레이더 표적인식, 레이더 신호처리, 표적 탐지 및 추적

김 홍 락 [LIG넥스원(주)/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-8742-7861>



1995년 2월: 대구대학교 전자전기컴퓨터학부 (공학사)
1997년 8월: 대구대학교 전자공학과 (공학석사)
1997년 7월~현재: LIG넥스원(주) 수석연구원

[주 관심분야] 적외선 영상 신호처리, 전원공급기 등

주 지 한 [LIG넥스원(주)/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-0643-6246>



2002년 8월: 충북대학교 전파공학과 (공학사)
2004년 8월: 광운대학교 전파공학과 (공학석사)
2008년 8월: 광운대학교 전파공학과 (공학박사)
2008년 7월~현재: LIGNex1 수석연구원

[주 관심분야] 초고주파 탐색기, 레이더 시스템

권 준 범 [LIG넥스원(주)/연구위원]

<https://orcid.org/0000-0001-9077-9641>



1997년 2월 : 연세대학교 전자공학과(공학사)
1999년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과(공학석사)
1999년 2월~현재: LIG 넥스원(주) 연구위원

[주 관심분야] 마이크로파 신호처리, 마이크로파 탐색기

우 선 결 [LIG넥스원(주)/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-5996-8962>



2001년 2월: 광운대학교 전자공학부 (공학사)
2003년 2월: 광운대학교 전파공학과 (공학석사)
2007년 7월: 광운대학교 전파공학과 (공학박사)
2007년 8월~현재: LIG넥스원(주) 수석연

구원

[주 관심분야] 레이더 신호처리, 마이크로파 탐색기 등

김 경 태 [포항공과대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0003-1200-5282>



1994년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학사)
1996년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)
1999년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)
2002년 3월~2011년 2월: 영남대학교 전

자공학과 교수

2011년 3월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 교수

2012년 9월~2017년 12월: 레이더/IR 표적식별 특화연구실실장

2018년 1월~현재: 무인감시정찰기술연구센터장

2019년 4월~현재: 차세대 영상레이다시스템 연구센터장

2020년 11월~현재: 차세대 국방융합기술 연구센터장

[주 관심분야] 레이더 신호 처리 및 영상, 레이더 표적인식 및 패턴인식, 전자기수치해석 및 RCS 측정