



Received: 2025/07/11  
Revised: 2025/07/24  
Accepted: 2025/09/04  
Published: 2025/09/30

**\*Corresponding Author:**

**Myunghoon Park**

Maritime R&D Center, LIG Nex1  
333 Pangyo-ro, Bundang-gu, Seongnam-si,  
Gyeonggi-do, 13488, Republic of Korea  
Tel: +82-31-5179-7267  
Fax: +82-31-5179-7086  
E-mail: myunghoon.park2@lignex1.com

**Abstract**

조기경보레이더는 탄도탄의 탐지를 목적으로 운용되는 전략적 감시 자산으로, 탐지 성능 확보를 위한 정량적 분석이 필수적이다. 본 연구에서는 펜스 탐지 개념을 기반으로, 발사 거리와 고각 펜스 범위에 따라 탄도탄의 단 분리 상태를 구분하고, 각 상태에 swerling 모델을 적용하여 시뮬레이션 기반의 탐지 가능성 분석을 수행하였다. 임의의 RCS 값에 대한 통계적 분석을 통해 최소 요구 SNR을 도출하고, 이를 바탕으로 레이더 운용 및 설계 시 고려해야 할 성능 마진을 정량적으로 제시하였다.

Early warning radars are critical strategic assets designed for the detection of ballistic missiles, requiring rigorous quantitative analysis to ensure reliable performance. This study proposes a simulation-based framework that RCS modeling using swerling models(random value of RCS) according to the missile's separation state within a defined fence search elevation range. The minimum required signal-to-noise ratio (SNR) is derived for a given detection probability and false alarm rate, thereby quantifying the radar performance margin needed under RCS uncertainty.

**Keywords**

조기경보레이더(Early Warning Radar),  
탄도탄 미사일 RCS(TBM RCS),  
펜스 탐색(Fence Search),  
스월링 모델(Swerling Model),  
레이더 M&S(Radar M&S)

# Swerling 모델 기반 탄도탄 탐지 레이더의 최소 요구 성능 도출

## Minimum Requirement Derivation for Ballistic Missile Detection Radar Using Swerling Models

박명훈<sup>1\*</sup>, 김정<sup>2</sup>, 고진용<sup>2</sup>, 장재덕<sup>2</sup>

<sup>1</sup>LIG넥스원 해양연구소 선임연구원

<sup>2</sup>LIG넥스원 해양연구소 수석연구원

Myunghoon Park<sup>1\*</sup>, Jeong Kim<sup>2</sup>, Jinyong Go<sup>2</sup>, Jaedeok Jang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Research engineer, Maritime R&D Center, LIG Nex1

<sup>2</sup>Chief research engineer, Maritime R&D Center, LIG Nex1

### 1. 서론

현대 전장 환경에서 탄도탄은 핵심적인 전략 무기로 자리매김하고 있으며, 이에 대응하기 위한 조기경보레이더(early warning radar)의 역할은 점점 더 중요해지고 있다[1]. 특히 탄도탄은 발사 이후 빠르게 고(高)고도로 상승하며 대기권을 이탈하기 때문에, 이를 조기에 탐지하고 추적하기 위해서는 광역 고각 펜스(fence) 형태의 탐지 운용이 요구된다. 이러한 펜스 탐지는 사전에 정의된 고각 범위를 주기적으로 감시하는 탐색 빔을 통해 이루어지며, 발사 초기 상승 구간에서 탄도탄이 이 펜스 영역을 통과할 때 탐지가 이루어져야 한다. 문제는 이 순간이 매우 짧고, 탄도탄의 동적 특성에 따라 탐지 성능이 극도로 민감하게 변동할 수 있다는 점이다.

탄도탄의 상승 구간에서는 보통 로켓이 분사 중이거나 단 분리 직후인 상태이며, 탄체의 자세 변화 및 분리체 구성에 따라 반사 단면적(RCS, radar cross section)이 급격히 변화한다. 그러나 탄도탄의 RCS는 대부분 기밀에 해당하며, 제원은 물론 비행 시 동적 특성 또한 정확히 알 수 없다. 본 논문에서는 탄도탄 RCS에 대한 모의 한계점을 고려하여 swerling을 기반으로 RCS 모델을 적용하여 탐지 가능성을 평가하고, 다양한 조건에서도 신뢰성 있는 탐지 성능을 확보할 수 있는 레이더 성능 요구 조건을 도출하고자 한다.

기존 연구들은 주로 RCS의 고정값 또는 단일한 확률 모델을 기반으로 한 성능 평가에 국한되어 있어, 펜스 범위 내 거리 및 고도

변화에 따른 단 분리 상태 변화, 이에 따른 RCS 변동 특성까지 포괄적으로 고려한 연구는 드물다[2-3]. 특히, 동일한 고각의 펜스 탐지 운용이라 하더라도 레이다와의 거리 변화에 따라 해당 구간의 탄도탄 고도와 단 분리 상태가 달라지기 때문에, 단일 RCS 가정을 통한 탐지 성능 평가는 실질적인 성능 신뢰성을 담보하기 어렵다. 실제로 탐지 실패 가능성이 존재하는 구간을 정확히 파악하고, 이를 설계상의 임계치 또는 운용 마진으로 반영하기 위해서는 다양한 탄도탄 제원 및 RCS 모델을 바탕으로 한 정량적 시뮬레이션 기반 분석이 필수적이다.

이에 본 연구는 조기경보레이다의 펜스 탐지 운용 개념을 기반으로, 입력된 탄도탄 제원(속도, 단 분리 시점 등) 및 펜스 고각 범위에 따라 펜스 내 탐지 구간별 탄도탄의 단 분리 상태를 추정하고, 각 단 분리 상태에 따라 가정 가능한 RCS 모델을 활용하여 최소 요구 신호 대 잡음비(SNR, signal-to-noise ratio)을 분석하는 시뮬레이션 프레임워크를 제안한다. 본 M&S 분석 도구는 탄도탄 제원에 따라 각 거리별 펜스 내의 분리 상태를 도출하고, RCS의 변동성을 고려하여 요구되는 SNR 마진 등을 정량적으로 시각화함으로써, 다양한 탄도탄 환경에서도 최소한의 탐지 성능을 보장할 수 있는 레이다 성능 조건을 산출하도록 구성되었다.

본 연구의 주요 증점은 다음과 같다. 첫째, 거리 기반 펜스 교차 조건과 탄도탄 궤적 정보를 활용하여 탐지 시점에서의 단 분리 상태를 추정한다. 둘째, 고정 RCS뿐만 아니라 swerling 모델을 통해 다양한 RCS를 적용하여 실제 레이다 운용 환경에서 발생 가능한 성능 편차를 수치적으로 검토한다. 셋째, 최소 요구 SNR을 분석하고 마진을 제시함으로써, 레이다 설계 시 고려해야 할 최악 조건 기반 탐지 성능 보장을 위한 근거를 제공한다.

다만 본 연구는 다음과 같은 한계를 가진다. 첫째, 탄도탄의 궤적은 실제 운용 데이터를 활용하지 않고, 탄도탄 M&S 모델에 기반한 결과를 제시한다. 둘째, 제시한 RCS 값은 공개 가능한 수준에서의 실무 추정치 또는 문헌 기반 가정이며, 실제 적국 탄도탄의 반사 특성을 반영하지는 않는다. 셋째, 본 연구는 복잡한 빔 운용을 반영한 탐지나 자원관리 알고리즘을 포함하지 않으며, 주어진 탐색 빔 운용 조건 하에서의 성능 정량화에 목적을 둔다.

이러한 한계에도 불구하고, 본 연구는 탄도탄 RCS에 대한 불확실성을 반영한 탐지 성능 분석의 필요성을 정량적으로 제시함으로써, 조기경보레이다 설계 및 운용 시 중요한 참고 기준으로 활용될 수 있을 것이다. 이후 장에서는 본 연구에서 제안한 분석 프레임워크의 구성 방식과 시뮬레이션 사례에 대해 상세히 기술한다.

## 2. 분석 개념 및 프레임워크

### 2.1 조기경보레이다의 펜스 탐지 운용

조기경보레이다는 일반적으로 고고도에서 빠르게 비행하는 탄도탄을 조기에 탐지하고 추적하는 임무를 수행한다. 이 과정에서 주로 활용되는 운용 방식 중 하나는 Fig. 1과 같이 일정한 고각 범위 내에서 탐색 빔을 순차적으로 조사하는 펜스 탐지 운용(fence search)이다[3].

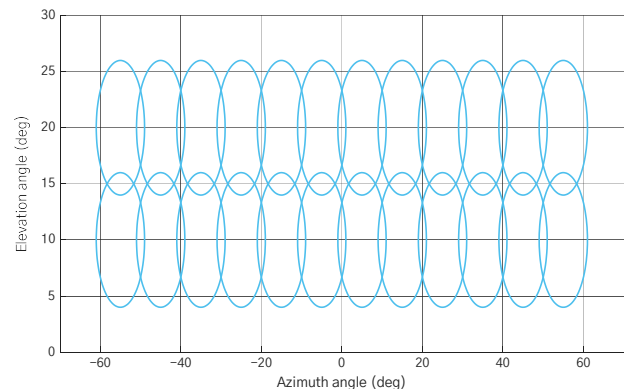


Fig. 1. Concept of fence search of early warning radar

펜스 탐지는 발사된 탄도탄이 상승 중 일정 고각에 도달했을 때 탐지 빔에 포착되도록 운용되며, 특정 고각 범위를 중심으로 다수의 고각 빔이 순차적으로 조사된다. 이 탐지 운용은 짧은 시간 안에 탄도탄의 탐지 가능성을 확보해야 하므로, 거리별로 탐지되는 고도와 시점이 레이다 성능 확보에 직접적인 영향을 미친다. 펜스 탐지 운용에서 중요한 특징은 고각이 일정하더라도 레이다와의 거리 변화에 따라 탄도탄의 탐지 고도 및 상태가 달라진다는 점이다. 동일한 고각이라 하더라도 탄도탄이 레이다 기준으로부터 서로 다른 거리에서 포착될 경우 해당 시점의 고도는 현저히 다르며, 이에 따라 단 분리 단계 및 자세 상태

또한 다를 수 있다. 이러한 차이는 탐지 시점에서의 RCS를 결정짓는 주요 요인이 된다.

2.2 탄도탄 거리-고도-분리 상태 상관 구조

탄도탄은 일반적으로 수직 또는 준(準)수직 궤적을 따라 발사되며, 특정 시간 이후 1단, 2단 등 단계적으로 단이 분리되는 구조를 가진다. 따라서 탄도탄의 속도, 단 분리 시점(time of stage separation), 비행 궤적 정보가 주어질 경우, 각 시간 또는 거리 구간에서 탄체가 어떤 상태(1단 분사 중/1단 분리 후/2단 분리 후 등)인지를 추정할 수 있다.

이러한 추정을 통해 특정 거리에서 펜스 고각과 교차하는 고도를 역산하고, 그 고도가 해당 탄도탄 궤적 상 어느 시점에 해당하는지를 판단함으로써, 거리 → 고도 → 시간 → 단 분리 상태로의 상관관계를 정립할 수 있다. 이 구조는 탐지 시점에 탄도탄이 어떤 단 분리 상태에 있었는지를 판단하는 핵심 근거가 되며, 이후 RCS 모델 할당에 직접적으로 활용된다. Fig. 2는 탄도탄 조기경보레이더의 펜스에 탄도탄이 탐지될 경우 각 시점에서의 단 분리 상태를 나타낸 결과이다. 해당 결과는 펜스 고각 범위, 탄도탄의 단 분리 시점 및 속도 등에 따라 달라진다.

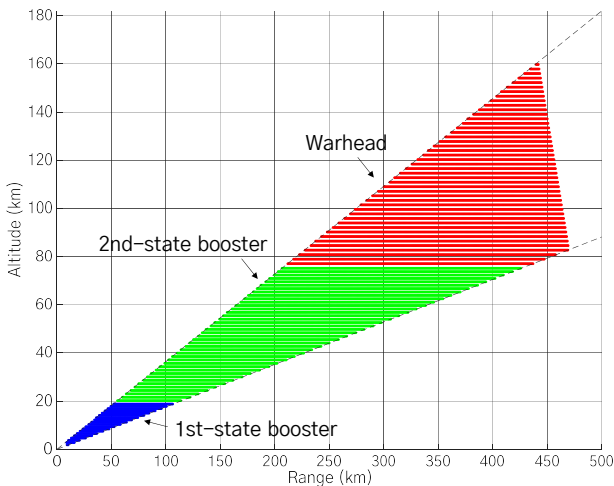


Fig. 2. Result of separation status of ballistic missile during boost phase

2.3 분석 프레임워크 구조

본 연구에서는 펜스 탐지 운용 조건과 탄도탄 제원을 입력값으로 받아, 각 거리 구간에서 탐지될 수 있

는 탄도탄의 단 분리 상태를 추정하고, 해당 상태에 따라 다양한 RCS 모델을 적용하여 탐지 가능성을 정량적으로 분석하는 프레임워크를 구성하였다. 구성 절차는 다음과 같다.

- (1) 입력값 정의
  - 펜스 고각 범위(예: 10° - 15°)
  - 기준 총측 최소 신호 대 잡음비(예: 13 dB)
  - 레이더 최대 탐지 거리(예: 500 km)
  - 탄도탄 제원(단 분리 단계별 속도 및 시점 등)
- (2) 거리별 탄도탄 궤적 교차 시점 계산
  - 거리마다 펜스 고각선과 교차하는 고도 계산
  - 해당 고도가 탄도탄 궤적 상 대응하는 시점 계산
  - 해당 시점의 탄도탄 상태(단 분리 단계) 도출
- (3) 단 분리 상태별 RCS 값 적용
  - 각 상태에 대해 정해진 고정(평균) RCS 값 적용
  - Swerling 모델을 통한 랜덤 요소 반영(예: 1단 비행 시 평균 RCS 1 + Swerling 3; 2단 비행 시 평균 RCS 0.1 + Swerling 3; 탄두 비행 시 평균 RCS 0.01 + Swerling 1)
- (4) Monte Carlo 기반 SNR 분석
  - 각 거리 구간에 대해 다수의 RCS 난수 샘플링 수행
  - 정의된 탐지확률( $P_d$ ), 오경보율( $P_{fa}$ )을 만족하는 최소 SNR 역산
  - 최소 RCS 대비 요구되는 SNR 마진 도출
- (5) 시각화 및 결과 해석
  - 거리 축 기반으로 단 분리 상태별 탐지 구간 시각화
  - 각 구간에서의 탐지 실패 위험도, 마진 부족 구간 식별

본 프레임워크는 현실적인 이유로 시뮬레이션 구현 시 몇 가지 가정을 따른다. 탄도탄은 단일 궤적(고정된 속도, 단 분리 시점)을 기준으로 분석하며, 변칙 궤적 또는 회피 기동은 고려하지 않는다. RCS 모델은

일반화된 모델링 방식에 기반하며, 실무에서 사용 가능한 수준의 근사치를 제공하는 것을 목적으로 한다. 레이더의 펄스 수, PRI, 시간 자원관리는 직접적으로 최적화하지 않고, 탐지확률 기준의 요구 SNR 산출만을 계산한다.

### 3. RCS 모델링

레이더 시스템 성능을 정량화하는 데 있어 RCS는 가장 핵심적인 변수 중 하나이다. RCS는 레이더 신호에 대해 물체가 반사하는 정도를 나타내는 척도로, 물리적 크기, 재질, 형상, 그리고 무엇보다 레이더에 대한 입사각(aspect angle)에 따라 크게 달라진다. 탄도탄은 고속 상승 중에 자세, 회전, 단 분리 등 다양한 비선형 특성이 중첩되기 때문에, RCS를 고정값으로 설정하는 것은 실효성이 낮다. 특히 탄도탄은 공개되지 않은 형상, 시간 기반 단 분리 및 자세 변화, 회피 설계 등으로 인해 레이더와의 상대적 조건에 따라 RCS가 매우 넓은 범위로 변화할 수 있으며, 이와 같은 불확실성으로 인해 실제 탐지 성능을 분석할 때 다양한 가정 모델을 기반으로 한 시뮬레이션이 필수적이다.

본 연구는 탄도탄 탐지 성능을 신뢰성 있게 분석하기 위해, 현실적인 근거와 해석력을 바탕으로 평균 RCS 값과 널리 알려진 swerling 모델을 이용하여 단 분리 단계별 서로 다른 RCS 값을 적용하였다.

#### 3.1 평균 RCS 값 정의

탄도탄은 일반적으로 1단, 2단 추진체 및 탄두(RV, reentry vehicle)의 다단 구조를 가지며, 각 구성요소는 물리적 형상, 표면 재질, 크기, 자세 안정성 등이 상이하여 서로 다른 RCS 특성을 가진다. 따라서 본 연구에서는 각 단 분리 상태별로 평균 RCS 값을 정의하고 이를 기반으로 탐지 성능 분석을 수행하였다.

먼저 1단 추진체는 대형 원통형 구조로 구성되며, 연소 중에는 고온의 배기가스 및 연료 탱크를 포함하고 있어 가장 큰 RCS를 가진다. 2단 추진체는 1단에 비해 상대적으로 크기가 작고 표면 형상도 간결하며, 비행 중 자세 변화에 따라 RCS 변동성이 더 커질 수 있다. 마지막으로 탄두는 재진입 기동이 가능한 소형 비행체로서, 일반적으로 작은 구형 또는 회전형 형상

을 가지며 RCS가 가장 작다.

본 연구에서는 관련 문헌 및 기술 보고서에 제시된 값과 물리적 형상 기반 근사값을 바탕으로, Table 1에 나타낸 것과 같이 각 단 분리 단계별 평균 RCS 값을 설정하였다. 특히 본 연구에서는 1단 추진체 단 분리에 따라 약 10 dB – 20 dB의 차이를 가지는 RCS를 선정하였다[4-7].

**Table 1.** Average value of RCS according to separation status

Boost phase	RCS value (m <sup>2</sup> )
1st-stage booster	5
2nd-stage booster	0.1
Reentry vehicle (warhead)	0.05

각 단계별 RCS 값의 경우 레이더 운용 조건 및 목적 등에 따라 입력 후 사용 가능하며, swerling 모델을 적용하여 시간적으로 변동하는 RCS 시계열 데이터를 생성하는 데 기반이 된다. 실제 RCS는 표적의 정확한 형상, 재질, 자세 및 관측 각도에 따라 크게 달라질 수 있으나, 본 연구는 다양한 RCS 불확실성 조건을 반영하기 위한 시뮬레이션 기반 분석을 목적으로 하므로 평균 RCS는 보수적 기준에 따라 설정되었다. 이와 같은 평균 RCS 기반 설정은 실질적인 레이더 성능 분석과 마진 확보에 있어 합리적인 기준점으로 작용한다.

#### 3.2 Swerling 모델

탄도탄 단 분리 상태에 따라 평균 RCS 값을 정의하고, 이에 swerling 확률 모델을 적용하는 방식이 일반적이다. Swerling 모델은 표적의 산란 특성 및 시간적 변동성을 통계적으로 모사하며, 특히 고정형 목표물뿐 아니라 회전 중이거나 불안정한 표적에 대해서도 일정 수준의 신뢰도 있는 RCS 분포를 제공한다. Swerling은 I, II, III, IV, V로 총 5개의 case로 구분되며 각 case는 RCS 변화의 속도 및 산란점 형태에 따라 적용된다[8-9]. Case I, Case II의 경우 산란점들이 비슷한 크기를 가질 때 사용되며, RCS 변화가 느린 표적에 대해선 Case I, 빠른 변화를 가진 표적에 대해선 Case II를 사용한다. Case III, Case IV의 경우

하나의 큰 산란점을 가질 때 사용되며, RCS 변화가 느리고 빠를 때 각각 Case III, Case IV를 사용한다. 마지막으로 Case V는 고정 RCS 값을 모의하며, 본 논문에서는 임의의 RCS에 대한 레이더 성능 모의를 위해 해당 case는 사용하지 않는다. Case I – Case IV는 식 (1)을 통해 모의할 수 있으며, 그 결과는 Fig. 3와 같다. 이는 평균 RCS에 따라 서로 다른 분포가 형성되며, 특정 기준에 따라 하나의 값을 선정하여 RCS 값으로 사용한다.

$$pdf_{RCS}(\sigma) = \frac{1}{\sigma_{av}} \exp\left(-\frac{\sigma}{\sigma_{av}}\right), \text{ where Case 1,2} \quad (1a)$$

$$pdf_{RCS}(\sigma) = \frac{4\sigma}{\sigma_{av}^2} \exp\left(-\frac{2\sigma}{\sigma_{av}}\right), \text{ where Case 3,4} \quad (1b)$$

여기서,  $\sigma$ : RCS 값,  
 $\sigma_{av}$ : RCS 평균값.

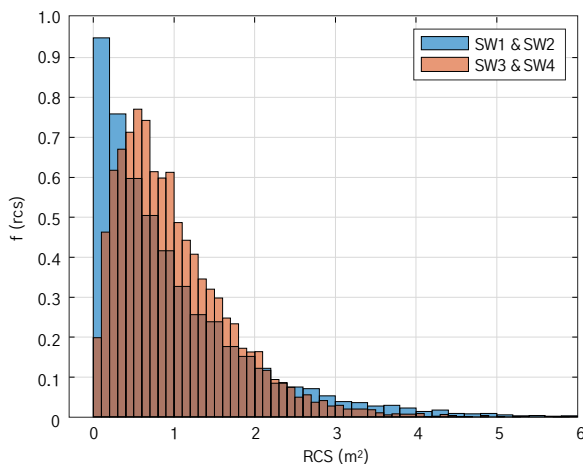


Fig. 3. Result of RCS distribution according to SW case (average RCS: 1 m<sup>2</sup>)

이러한 방식은 단순하지만 레이더 탐지 확률 계산에 매우 유용하며, 실시간 판단이나 경계 조건 시나리오에 효과적으로 활용될 수 있다.

#### 4. 시뮬레이션 설정 및 결과분석

본 장에서는 제안한 분석 프레임워크를 바탕으로 펜스 내 탄도탄 탐지 성능을 평가하고, 임의의 RCS를 반영하여 레이더의 최소 요구 SNR을 도출하였다. 레이더 성능 조건, 탄도탄 제원, 펜스 범위 및 RCS 모델은 Table 2와 같이 설정하였다. 이때 swerling 모델을 통해 생성된 RCS의 분포 중 하나의 값을 선택해

야 하는데 본 논문에서는 하위 10 %에 해당하는 값을 선택하여 사용하였다.

Table 2. Condition of simulation

Properties	Value	
Velocity	1st	1 km/s
	2nd	1.5 km/s
	RV	2 km/s
Separation time	1st	20 sec
	2nd	60 sec
Fence coverage	10 deg – 20 deg	
Required SNR	13 dB	
Maximum range	500 km	
Average RCS value	1st	5 m <sup>2</sup>
	2nd	0.1 m <sup>2</sup>
	RV	0.05 m <sup>2</sup>
Swerling case	Case 2, Case 4	
Percentile RCS	10 %	

#### 4.1 기준 레이더 성능 및 SNR 분포

기준 레이더 성능은 RCS가 1 m<sup>2</sup>인 목표물에 대해 600 km 거리에서 SNR 13 dB를 확보할 수 있도록 설정하였다. 이는 swerling 모델 적용 전의 분석 조건으로, 해당 설정에서의 탐지 확률 ( $P_d$ )은 80 %를 기준으로 하였다. 이 기준 성능 하에서의 거리 및 고도에 따른 펜스 내부 영역 전체에 대해 SNR 결과는 Fig. 4와 같다.

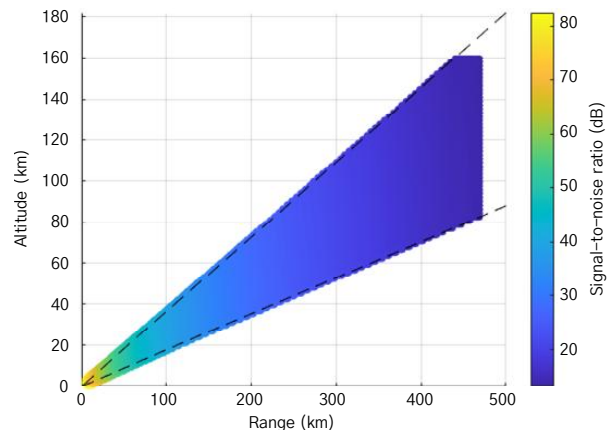


Fig. 4. Result of signal-to-noise ratio

해당 결과는 swerling 기반 확률 분포를 적용하지 않은 상태의 기준 데이터로, 이후 swerling 모델을 통한 RCS 값 적용 시 SNR 마진 평가의 기준이 된다.

#### 4.2 Swerling 모델 기반 레이다 성능 분석

설정된 평균 RCS 값에 swerling RCS 모델을 적용하여, 펜스 내 거리별 탐지 성능 변동을 분석하였다. 본 연구에서는 세 가지 분석 케이스를 구성하여 단 분리 단계에 따른 RCS 특성과 SNR 요구량의 변화를 정량적으로 비교하였다.

##### 4.2.1 Case 1: 전체 단계에 Swerling Case 4 적용

첫 번째 케이스에서는 1단, 2단, 탄두 등 모든 단계에 대해 Swerling Case 4를 적용하였다. 이는 탄도탄의 RCS가 빠르게 변화하고 하나의 큰 산란점을 가지는 경우로, 전파 환경에 민감하게 반응하는 표적 상황으로 가정하였다. 이 경우 각 단 분리 단계에서의 평균 RCS에 기반하여 수천 회의 Monte Carlo 시뮬레이션을 수행하여 하위 10%에 해당하는 값을 사용하였으며, 요구 탐지 성능을 만족하기 위해 필요한 SNR 값을 도출하였다. 그 결과 Fig. 5와 같이 1단계 분리 후 급격한 RCS 감소로 약 167 km부터 탐지 성능을 만족하지 못하여 SNR 마진이 필요하며, 특히 탄두 구간부터는 약 10 dB 이상의 성능 향상이 필요함을 보였다. 결과적으로 목표 최대 탐지 거리를 고려하였을 때 모든 구간에서 안전한 탄도탄 탐지를 위해서는 약 18 dB 이상의 마진을 가지고 설계 또는 운용해야 함을 알 수 있다.

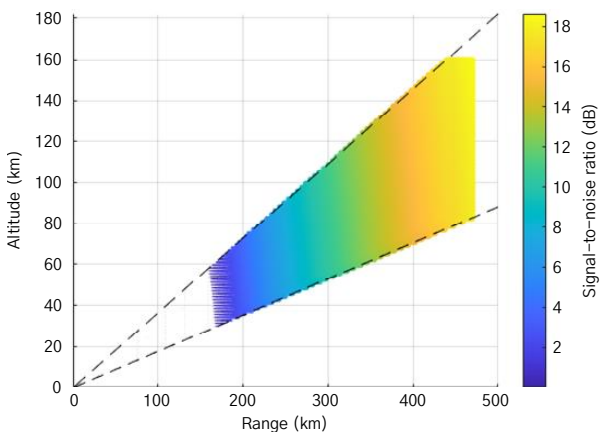


Fig. 5. Result of required SNR(all phase: Swerling Case 4)

##### 4.2.2 Case 2: RV에 Swerling Case 2 적용

두 번째 케이스의 경우 RV는 일반적으로 탄두에 해당하여 추진이 끝난 상태로 상대적 RCS 변동이 작고 큰 하나의 산란점 없이 분포한 경우로 가정한 케이스이다. 탄두 단계에서 본체와 탄두 형상 특성을 반영하기 위하여 RV에는 Swerling Case 2를 적용하고 1단 및 2단은 Swerling Case 4로 유지하였다. 그 결과는 Fig. 6와 같으며, Fig. 5와 비교했을 때 큰 산란점이 없는 탄두 구간으로 약 4 dB의 SNR 마진이 더 필요한 것을 볼 수 있었다.

##### 4.2.3 Case 3: 하위 분위 기반 최소 SNR 평가

추가 분석으로, 각 거리 구간에 대해 생성된 swerling RCS 분포에서 하위 20%, 1% 분위에 해당하는 값을 선택하여, 그 값을 기준으로 탐지 성능을 만족하기 위한 최소 SNR을 계산하였다. 이는 보수적인 레이다 운용 환경을 가정했을 때 요구되는 여유 마진(SNR margin)을 산정하기 위한 방식으로 활용할 수 있으며, 그 결과는 Fig. 7과 같다.

RCS 하위 10% (Fig. 6 참조)를 선택과 비교했을 때 동일하게 1단계 단 분리까지 탐지 성능이 원활한 것을 확인할 수 있다. 하지만 2단계 단 분리에서는 하위 20%의 경우 SNR 마진이 약 3.3 dB 증가하여 탐지 성능을 만족하는 거리가 좀 더 증가한 것을 볼 수 있으며, 반대로 하위 1%의 경우 SNR 마진이 약 10 dB 감소하여 보다 가까운 거리까지 탐지가 미확보된 것을 볼 수 있었다. 또한 탄두 단계에서의 필요한 SNR 마진의 경우에도 하위 20%는 줄어 들고 하위 1%에

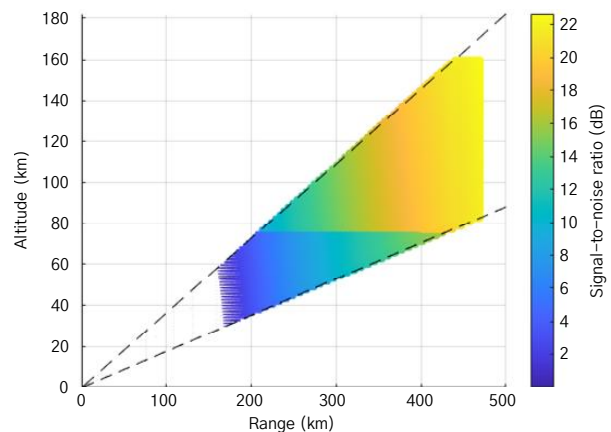


Fig. 6. Result of required SNR(RV phase: Swerling Case 2)

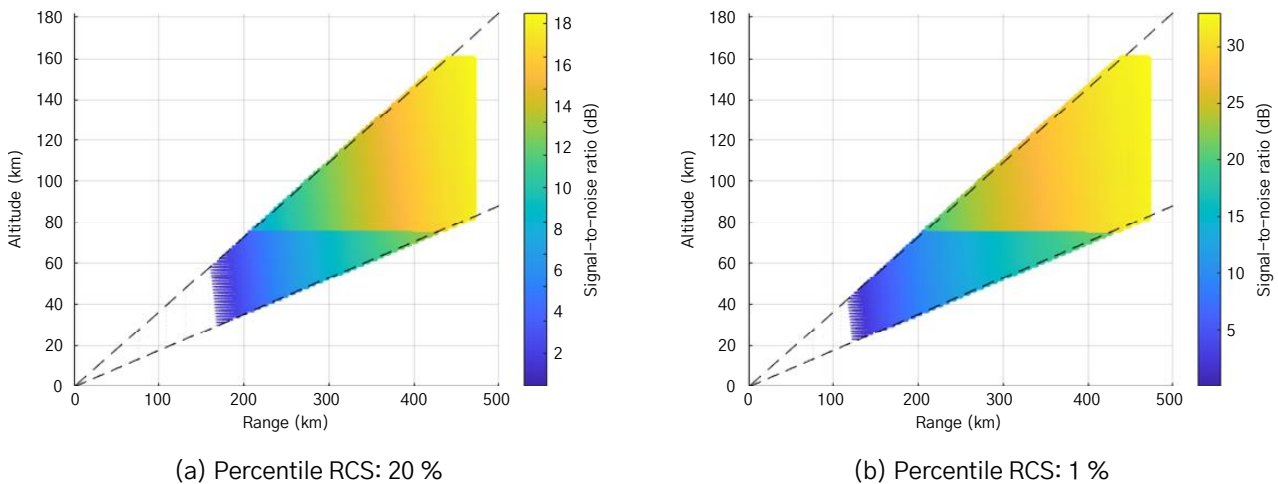


Fig. 7. Result of required signal-to-noise ratio according to percentile RCS

서는 증가한 것을 보였다.

결과적으로, 동일한 평균 RCS를 적용한 상황에서도 RCS 분포의 하단을 기준으로 한 설계는 필요 SNR을 상당히 높이는 요인이 되며, 이는 레이더 운용자 또는 설계자에게 현실적이고 유의미한 요구조건 제시의 기준이 될 수 있다.

## 5. 결론

본 연구는 조기경보레이더의 탐지 성능 분석에 있어 핵심적인 불확실성 요소인 탄도탄 RCS의 변동성을 정량적으로 분석하고, 이를 기반으로 최소한의 요구 성능 마진을 제시하기 위한 시뮬레이션 기반 분석 프레임워크를 제안하였다.

현실적으로 탄도탄의 정확한 RCS는 국가 안보상의 이유로 공개되지 않거나 시기별로 상이한 제원을 가질 수 있으므로, 다양한 가정 기반의 모델을 설정하고, 단 분리 상태 및 자세 변화 등 비선형 동역학 요소를 고려한 분석이 필요하다. 본 연구에서는 이러한 변동성을 반영하기 위해 널리 알려진 swerling 모델을 통해 임의의 RCS를 생성하고 Monte Carlo 기반의 탐지 가능성 분석을 수행하였다. 이를 통해 거리별 펜스 통과 구간에서의 단 분리 상태를 추정하고, 해당 상태에서 발생 가능한 RCS 범위를 적용함으로써, 특정 탐지 확률과 오(誤)탐지율 조건을 만족하기 위한 최소 SNR을 산출할 수 있었다.

이와 같은 분석은 단순히 신호 감쇠 또는 통계적 평균값을 기반으로 하는 기존 방식에서 벗어나, 물리적

상태 변화에 기반한 탐지 불확실성을 고려할 수 있다는 점에서 현실적 의미가 크다. 또한 시뮬레이션 결과를 시각적으로 도식화함으로써, 레이더 운용자 및 체계 설계자에게 직관적인 성능 판단 기준을 제공할 수 있다.

향후 연구에서는 실제 궤적 기반의 고정밀 탄도탄 모델을 적용하고, RCS 실측 또는 복합 물리 기반 산란 모델을 반영함으로써 본 분석 프레임의 정밀도와 신뢰도를 더욱 향상시킬 수 있을 것이다. 아울러 탐지 실패 가능성을 기반으로 하는 자원관리 알고리즘, 예측 기반의 펜스 운용 최적화 등과 결합된다면, 보다 실시간 운용에 가까운 분석 도구로 발전시킬 수 있을 것으로 기대된다.

## 참고문헌

- [1] M. L. Stone and G. P. Banner, "Radars for the Detection and Tracking of Ballistic Missiles, Satellites, and Planets," *Lincoln Laboratory Journal*, Vol. 12, No. 1, pp. 217-240, 2000.
- [2] J. Kim and Y. Kwon, "An Analysis of the Ballistic Missile Detection Characteristics of a Radar Depending on RCS," *Korean Journal of Military Arts and Science*, Vol. 17, No. 2, pp. 1-17, Jun. 2015.
- [3] M.-H. Park, J.-Y. Go, J. Kim, S.-W. Kwon, and K.-W. Lee, "Ballistic Missile Early Warning Radar Performance Analysis Tools: Development and Utilization," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, Vol. 27, No. 9, pp. 1087-1097, Sep. 2023.
- [4] NATO RTO-SET-071, Radar Signature Modelling for

Targets and Backgrounds, North Atlantic Treaty Organization, 2004.

[5] N. Sahasrabudhe, N. Siddharth, K. Anilkumar, and M. S. Bhat, "RCS Modeling and Validation of a Full Scale Launch Vehicle Using Measurements and Computational EM Tools," *Progress In Electromagnetics Research M*, Vol. 117, pp. 147–158, 2023.

[6] J. R. Lamb, "Investigation of the Effects of Target Feature Variations on Ballistic Missile Reentry Vehicle Radar Cross Section," M.S. thesis, Dept. of Electrical and Computer Engineering, Air Force Institute of Technology,

Wright–Patterson AFB, OH, USA, 2001.

[7] D. Liu, Y. Gao, and H. Guo, "Statistical Analysis of Hypersonic Glide Vehicle Radar Cross Section," *IEEE Access*, Vol. 11, pp. 68203–68214, 2023.

[8] S. Veerabathini, P. S. Reddy, and P. R. Reddy, "RCS Modeling and Validation of Full Scale Launch Vehicle for Its Real Time Dynamic Trajectory," *Defence Science Journal*, Vol. 73, No. 5, pp. 505–511, Sep. 2023.

[9] M. I. Skolnik, *Radar Handbook*, 3rd ed. New York, NY, McGraw–Hill, 2008.