



Received: 2025/07/22
Revised: 2025/08/05
Accepted: 2025/09/11
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

해상에서 운용되는 함정에 탑재된 레이다는 파랑에 의한 지속적인 요동에 노출되며, 이에 따라 실시간 빔 조향 보상이 필요하다. 본 연구에서는 해상 상태, 함정 속도, 파도의 진입각 등 현실적인 외란 조건을 반영하고, 빔 조향 알고리즘 기반 레이다 모델, RAO 기반 함정 운동 모델을 통합한 시뮬레이션 도구를 구성하였다. 시뮬레이션 결과, 예측 보상은 일정 조건에서 지연 보상 대비 의미 있는 성능 개선을 보였다.

Shipborne radars operating in maritime environments are continuously subjected to platform motion induced by sea waves, requiring real-time beam compensation to maintain tracking accuracy. This study proposes an integrated modeling and simulation framework that incorporates realistic sea states, ship speeds, and wave incident angles, combining a radar signal model based on predictive beam steering algorithm, a ship motion model based on response amplitude operators. Simulation results demonstrate that predictive compensation can provide significant performance improvement under certain conditions compared to delayed compensation.

Keywords

해상 환경(Sea Environment),
빔 보상(Beam Compensation),
함정 운동(Ship Motion),
빔 조향 손실(Beam Steering Loss),
레이다 M&S(Radar Modeling and Simulation)

해상 운용 조건에서의 함정 요동에 따른 레이다 빔 조향 성능 M & S 분석

M&S-based Analysis of Radar Beam Steering According to Ship Motion under Maritime Operating Conditions

박명훈^{1*}, 고진용², 김정², 이성균², 장재덕²

¹LIG넥스원 해양연구소 선임연구원

²LIG넥스원 해양연구소 수석연구원

Myunghoon Park^{1*}, Jinyong Go², Jeong Kim², Sungkyun Lee², Jaedeok Jang²

¹Research engineer, Maritime R&D Center, LIG Nex1

²Chief research engineer, Maritime R&D Center, LIG Nex1

1. 서론

해상에서 운용되는 함정은 다양한 해상 상태(sea state)에 노출되며, 이에 따라 지속적인 자세 변화가 수반된다. 파도의 높이, 주기, 진입각에 따라 함정은 roll, pitch, yaw 등의 6자유도 운동을 발생시키며, 이러한 요동은 함정에 탑재된 센서 및 무기체계 전반에 직접적인 영향을 미친다. 특히 레이다 시스템은 표적을 안정적으로 탐지하고 추적하기 위해 일정한 안테나 방향성을 유지해야 하며, 플랫폼 자세 변화에 따라 이에 대한 보상이 실시간으로 이루어지지 않으면 탐지 성능의 급격한 저하를 야기할 수 있다. 이러한 특성으로 인해, 함정 플랫폼에 탑재된 레이다는 고정식 지상 레이다와는 달리 외부 동요 조건을 지속적으로 고려한 보정이 요구된다.

현대 해군 함정에서 주로 사용되는 위상 배열 기반의 다기능 레이다(MFR, multi-function radar)는 전자식 빔 조향(electronic beam steering)을 통해 안테나 기계 회전 없이 다양한 표적을 실시간으로 탐지하고 추적한다. 이 과정에서 플랫폼 자세 변화에 따른 빔 방향 오차를 보정하기 위해 안테나 조향각을 자동으로 계산하여 빔을 재조정하게 되는데, 이때 전자식 빔 보상이 수행되면서 조향 손실(steering loss)은 조향각에 따라 필연적으로 발생하게 된다. 이는 곧 안테나 이득 감소로 이어지며, 신호 대 잡음비(SNR,

signal-to-noise ratio)의 저하, 탐지 확률 감소 등 레이더 성능 저하로 직결된다.

조향 손실은 보상각의 크기에 따라 증가하기 때문에, 함정 요동의 크기와 빈도는 레이더 운용 성능의 신뢰도를 결정짓는 주요 요소로 작용한다. 함정 요동은 단일 원인이 아닌 해상 상태, 함정 속도, 파도의 진입각 등 복합적인 환경 조건의 영향을 받는다. 일반적으로 함정 속도가 증가하면 파도의 입사 주기가 짧아지고 요동 응답의 주파수가 상승하게 되며, 파도의 진입각이 횡방향에 가까울수록 roll 성분이 지배적으로 나타난다. 또한 해상 상태가 높아질수록 파고와 파 주기가 증가하고, 이에 따른 요동 진폭도 함께 증가하여, 조향각 오차 및 레이더 성능 저하 가능성이 더욱 커지게 된다. 이러한 변수들은 레이더 설계 시 고려되어야 할 핵심 설계 인자로, 요구 성능 달성을 위한 마진 설계에 반드시 반영되어야 한다.

이러한 배경에서, 함정의 요동과 레이더 성능 저하 간의 관계를 해석하기 위한 시뮬레이션 기반 분석 연구들이 진행되었다[1-3]. 일반적으로 선형 운동 응답(RAO, response amplitude operator) 기반의 조선 해양 시뮬레이션 기법과, 안테나 이득 감소 및 SNR 기반 레이더 성능 평가 모델을 통합하여, 특정 해상 상태에서의 평균적인 손실 특성을 분석하는 방식이 대표적이다. 그러나 대부분의 기존 연구는 함정의 속도를 반영한 실제 기동 중인 함정의 복잡한 요동 특성을 고려하지 않았다. 또한 다양한 파도의 진입각이 레이더에 미치는 영향을 충분히 분석하지 못했다. 특히 실제 시스템에서는 다양한 파도의 상태 및 함정 기동에 따라 최대 탐지거리에서의 레이더 성능이 민감하게 반영된다. 따라서 함정에 탑재된 레이더의 경우 다양한 해상 조건에서의 레이더 성능 저하를 예상하여 마진을 둔 설계 및 운용이 필수적이다.

본 논문에서는 이러한 상황을 고려하여 실질적인 해상 작전 운용 조건을 반영하기 위해 다음과 같은 통합 모델링 및 시뮬레이션 기반 분석을 수행하였다. 첫째, 특정 함정 형상에 따라 선박 운동해석 상용도구인 WASIM을 통해 함정 속도에 따른 RAO를 계산하고, 이를 기반으로 해상 상태, 함정 속도, 파도 진입각 조건에 따라 함정 요동(roll, pitch, yaw)을 시계열로 생성한다. 둘째, 함정 요동에 따라 안테나 기준 빔 조향 보상 각도를 계산하여 해당 각도의 빔 조향 손실을 계산한다. 셋째, 다양한 해상 조건(해상 상태, 파 진입

각, 함정 속도)에 따라 빔 조향 손실을 정량적으로 분석한다.

본 논문이 제안하는 M&S 도구는 단순한 설계 마진 확보를 넘어서, 레이더 제어 시스템의 운용 안정성 확보 및 제어 전략 선택에 필요한 정량적 근거를 제공하는 데에 그 목적이 있다.

2. M&S 모델 구성 및 통합

현실적인 함정 운용환경에서 레이더 성능을 정량적으로 분석하기 위해서는, 레이더 시스템이 수신하는 신호 세기를 계산할 수 있는 레이더 모델, 함정의 6자유도 운동을 반영할 수 있는 운동 해석 모델, 그리고 함정 요동에 따른 빔 보상 조향 계산 및 조향 손실 모델이 상호 연계되어야 한다. 본 장에서는 본 연구에서 사용된 레이더 모델, 함정 운동 모델, 빔 조향 계산 모델 구성에 대해 상세히 기술한다.

2.1 레이더 모델

레이더 성능을 평가하는 가장 기초적인 척도는 수신 신호의 세기, 즉 신호 대 잡음비이며 이는 식 (1)과 같은 레이더 방정식을 통해 계산된다[4].

$$SNR = \left(\frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \tau_p N_p \sigma_t}{(4\pi)^3 R^4 \kappa T L_p L_{sys}} \right) \times G_{sp} \quad (1)$$

여기서, P_t : 송신전력(W),

G_t : 송신이득(W/W),

G_r : 수신이득(W/W),

λ : 파장(m),

τ_p : 펄스 폭(sec),

N_p : 펄스 수,

σ_t : RCS(m²),

R : 표적 거리(m),

L_p : 대기손실(W/W),

L_{sys} : 시스템손실(W/W),

κ : Boltzman's constant[W/(Hz K)],

T : 시스템 잡음 온도(K),

G_{sp} : 신호처리 이득(W/W).

식 (1)을 통해 산출된 SNR은 표적 탐지 확률(P_d %)

계산에 사용되며, 식 (2)와 같이 표현된다[5].

$$P_d = \frac{1}{1 + e^{-B}} \quad (2a)$$

$$B = \frac{10^Z - A}{1.7 + 0.12A} \quad (2b)$$

$$A = \ln\left(\frac{0.62}{P_{fa}}\right) \quad (2c)$$

$$Z = \frac{SNR + 5 \log_{10} N}{6.2 + \frac{4.54}{\sqrt{N + 0.44}}} \quad (2d)$$

여기서, P_{fa} : 오탐지율,
 N : 비동기적 적분 횟수.

2.2 함정 운동 모델

함정의 요동은 파랑 응답 해석을 통해 시계열 형태로 도출될 수 있다. 본 연구에서는 함정 형상과 주요 수치(길이, 폭, 흘수, 배수량 등) 정보를 기반으로 WASIM을 활용하여 운동 응답 함수 RAO를 계산하고, 해상 상태에 따라 정의되는 불규칙파 스펙트럼을 중첩하여 시간 영역에서의 자세 변화(roll, pitch, yaw)를 생성하였다. RAO는 식 (3)과 같이 정의된다.

$$RAO(\omega) = \frac{X(\omega)}{A(\omega)} \quad (3)$$

여기서, $X(\omega)$: 파 주파수 ω 에 대한 함정 응답 진폭,
 $A(\omega)$: 입력 파 진폭.

RAO는 일반적으로 선박 수치 해석 도구(WASIM 등)로 계산되며, 이때 대상 함정으로는 SIMMAN의 US Navy Combatant DTMB 5415를 사용하였다[6].

파랑은 ITTC 스펙트럼으로 식 (4)와 같이 묘사하였다.

$$S_\zeta(\omega) = \frac{A}{\omega^5} e^{-B/\omega^4} \quad (4a)$$

$$A = \frac{173 \cdot H_{1/3}^2}{T_1^4} \quad (4b)$$

$$B = \frac{691}{T_1^4} \quad (4c)$$

여기서, ω : 파 주기 (rad/s),
 $H_{1/3}$: 유의 파고 (m),
 T_1 : 평균 주기 (sec).

불규칙파는 이 스펙트럼을 바탕으로 주파수별 에너지 분포를 고려하여 합성되며, RAO와의 컨볼루션을 통해 시간 영역 운동 응답을 도출하였다. 본 모델에서는 roll, pitch, yaw 성분을 활용하여 레이다 안테나 축 중심의 변화를 계산하였다.

2.3 빔 조향 계산 모델

함정의 요동으로 인해 레이다는 실제 표적과의 방향 벡터에서 오차를 가지게 되며, 이때 보상을 위해 조향각(azimuth, elevation)을 조정한다. 하지만 조향각이 커질수록 안테나 패턴 이득이 감소하게 되며, 이는 SNR 감소로 이어진다. 식 (5)를 통해 함정 요동에 따른 위상 배열 안테나 패턴의 조향 손실을 표현할 수 있다.

$$G_{t,r} = G_{t,r} \times \cos(A) \times \cos(B) \quad (5a)$$

$$A = \sin^{-1}(\sin d(Az) \times \cos d(El)) \quad (5b)$$

$$B = \sin^{-1}(\sin d(El)) \quad (5c)$$

여기서, Az, El : 방위 빔 조향 각도 (deg).

이때 함정에 탑재된 레이다와 함정 간 좌표계 변환이 필요하다. 함정 모델의 출력인 자세 정보(roll, pitch, yaw)를 기반으로 레이다 빔이 향하는 방향 벡터를 계산하고, 이를 조향각(azimuth, elevation)으로 변환하는 과정을 통합 모델 내에 포함하였다.

함정 자세는 항공역학 기준의 회전 순서인 z-y-x (yaw-pitch-roll) 회전으로 표현된다. 이때 전체 회전 행렬 R 은 식 (6), 각 축의 회전 행렬은 식 (7)과 같이 정의된다[7].

$$R = R_z(\text{yaw}) \cdot R_y(\text{pitch}) \cdot R_x(\text{roll}) \quad (6)$$

$$R_z(y) = \begin{bmatrix} \cos y & -\sin y & 0 \\ \sin y & \cos y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7a)$$

$$R_y(p) = \begin{bmatrix} \cos p & 0 & \sin p \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin p & 0 & \cos p \end{bmatrix} \quad (7b)$$

$$R_x(r) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos r & -\sin r \\ 0 & \sin r & \cos r \end{bmatrix} \quad (7c)$$

기준 빔 조향 벡터 V_0 는 표적 방위 및 고각을 기준으로 하여 식 (8)을 통해 설정하며, 함정의 자세 변화를 반영하는 실제 조향 벡터는 식 (9)와 같이 계산된다.

$$V_0 = \begin{bmatrix} \cos(El) \cos(Az) \\ \cos(El) \sin(Az) \\ \sin(El) \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$V_{beam} = R \cdot V_0 \quad (9)$$

이 조향 벡터 $V_{beam} = [v_x, v_y, v_z]^T$ 를 구면 좌표계로 변환하여 레이더의 방위각 및 고각을 식 (10)과 같이 계산할 수 있다.

$$Az = \tan^{-1}(v_y, v_x) \quad (10a)$$

$$El = \tan^{-1} \left(\frac{v_z}{\sqrt{v_x^2 + v_y^2}} \right) \quad (10b)$$

본 연구에서는 함정 요동으로 인해 발생하는 빔 보상 각도를 기반으로 빔 방사 순간순간의 안테나 이득 손실을 계산하고, 이에 따른 시간 기반 수신 신호 감쇠를 분석한다.

2.4 통합모델 구성

본 연구에서 제안하는 통합 M&S 도구는 앞서 정의한 세 가지 구성 요소(레이더 신호 수신 모델, RAO 기반 함정 운동 모델, 빔 조향 계산 모델)을 하나의 프레임워크로 통합하여, 실제 환경을 근사한 조건에서의 레이더 성능 저하를 정량적으로 평가할 수 있도록 설계되었다. 전체 구성 흐름도는 Fig. 1과 같으며, 순차적으로 다음과 같은 과정을 거친다.

- 운용 조건 입력: 해상 상태(sea state), 함정 속도, 파 진입각 등 외부 환경 요소와 레이더 제원 표적 위치 등을 입력 변수로 설정

- 운동 응답 계산: 함정 형상과 RAO 데이터를 바탕으로 roll, pitch, yaw 시계열을 생성
- 조향 손실 및 신호 감쇠 계산: 순간적인 조향각에 따라 안테나 이득을 계산하고, 이에 따라 수신 신호 손실 계산
- 성능 평가: 다양한 해상 조건에서의 레이더 성능 변화(P_d %) 정량적 분석

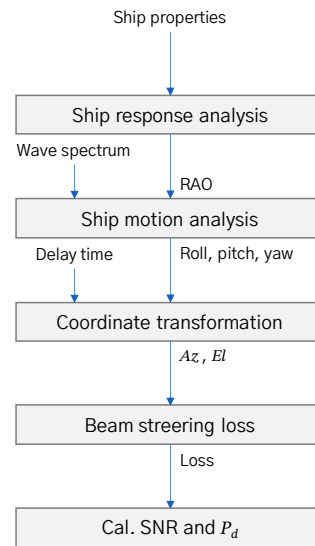


Fig. 1. The flow diagram of M&S

3. 시뮬레이션 설정 및 결과 분석

본 장에서는 제안된 통합 M&S 도구를 기반으로, 파랑 환경과 함정 기동 조건에 따라 발생하는 함정 요동을 반영하고, 이에 따른 조향 손실 및 수신 성능 저하를 정량적으로 분석하였다.

3.1 분석 시나리오 설정

분석에 사용된 조향 보상 지연 시간은 센서 측정 및 처리, 안테나의 전자식 빔 조향까지 포함된 하나의 통합 시간으로 전체 시나리오에서 동일한 고정값(0.02 ms)으로 설정하였다. 또한 표적의 경우 빔 조향에 따른 레이더 성능 분석만을 위해 레이더의 최대 탐지거리에 함정과 동일한 기동으로 상대 위치에 변화가 없는 것으로 가정하였다. 그 외 외부 환경 변수로는 파도의 진입각, 함정 속도, 해상 상태가 있으며 Table 1과 같이 설정하였다. 이때 레이더 성능의 경우 200 km에서 탐지 확률 80 %로 모의하였다. 해

상 상태의 경우 Sea State 6을 해군 기준에서 일반적인 작전 운용 한계선으로 간주하여 Sea State 0부터 6까지의 범위로 설정하였으며, 그 이상은 극한 환경으로 분석 대상에서 제외하였다.

Table 1. Condition of simulation

Properties	Value
Sea State	1, 2, 3, 4, 5, 6
Ship velocity (m/s)	0, 4, 8, 12, 16
Wave direction (deg)	180(head), 150, 120

분석 시 레이다 운용 조건으로 최대 탐지거리에서의 탐지 성능을 기준으로 고정하여 레이다가 표적을 설계된 최대 탐지거리(R_{max})에서 탐지하고 있다고 가정하고, 그 지점에서의 수신 손실 정도에 따른 탐지 확률을 성능 평가 지표로 삼아 레이다의 운용 안정성을 평가하였다.

3.2 결과 분석

본 절에서는 3장에서 설정한 시나리오에 대해 시뮬레이션을 수행하고, 해상 조건에 따른 탐지 확률의 변화를 정량적으로 비교하였다. 함정 운동 해석은 함정의 고유 운동 특성이 포함된 RAO와 해상 상태에 따른 파 스펙트럼의 중첩을 통하여 계산된다. 각 해석 조건의 변화에 의해 스펙트럼의 주파수별 크기

와 피크 주파수가 달라지고 이로 인해 운동 해석 결과도 다양하게 나타나게 된다.

먼저 해상 상태의 경우, Fig. 2와 같이 해상 상태가 커질수록 파 스펙트럼의 피크 주파수도 달라지지만 크기 자체가 커지는 특성이 주요하여 일반적으로 함정 요동이 커지고 이로 인해 탐지 확률의 변화가 심해지는 것을 볼 수 있다.

하지만 함정 속도는 Fig. 3와 같이 각 조건의 변화에 따라 파 스펙트럼과의 주파수적인 중첩 특성으로 인해 운동이 커졌다가 작아지기도 하여 탐지 확률의 변화도 일정하게 커졌다가 작아지기도 하는 것을 볼 수 있다. Sea State 3일 경우 탐지 확률 분포가 8 m/s 속도까지 커지다가 다시 줄어드는 것을 보였으며, 반대로 Sea State 6의 경우 속도가 증가함에 따라 분포가 커짐을 볼 수 있다.

유사하게 파 진입 각도의 경우에도 함정의 형상에 따른 파 스펙트럼과의 주파수적인 중첩 특성으로 인해 Fig. 4(a)와 같이 Sea State 3의 모든 함정 속도에서 파 진입이 측면으로 갈수록 함 요동이 증가하다가 감소하여 탐지 확률 변화도 커지다가 줄어드는 반면, Fig. 4(b)와 같이 Sea State 6에서는 파 진입 각도가 측면으로 갈수록 점차 증가하여 탐지 확률 변화가 커짐을 볼 수 있다.

이렇게 각 해석 조건의 변화에 따라 탐지 확률이 달라지지만, 함정의 속도, 파 진입 각도에 따른 변화보다 해상 상태에 따른 탐지 확률 변화가 큰 것을 볼 수 있다. 이러한 변수에 따른 탐지 확률 변화의 민감도를 보기 위해 Table 1을 기반으로 다양한 조건의 조

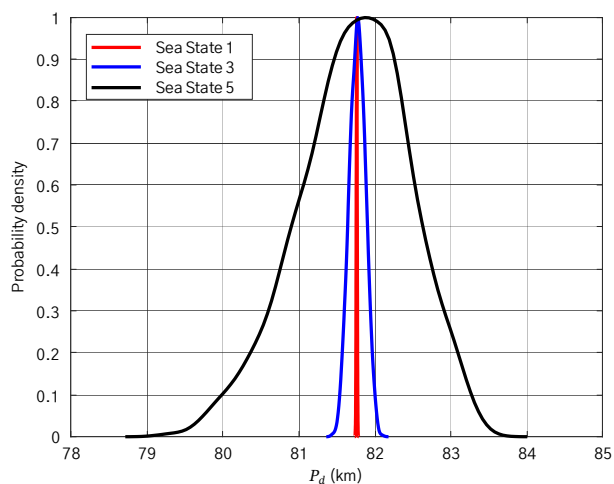


Fig. 2. Result of simulation according to sea state (wave direction: 180°, velocity: 8 m/s)

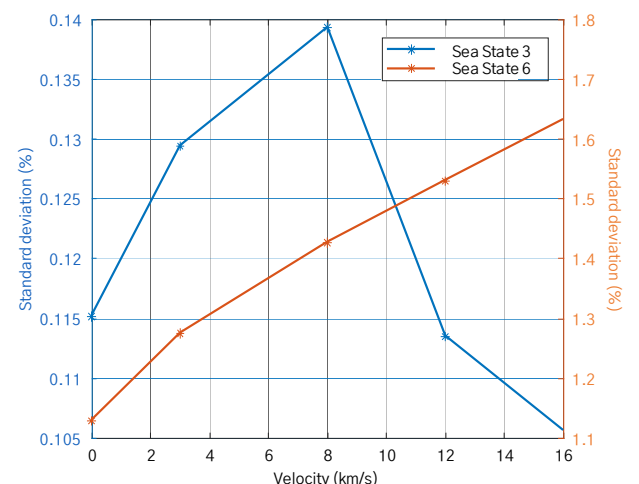


Fig. 3. Result of standard deviation according to velocity (wave direction: 150°)

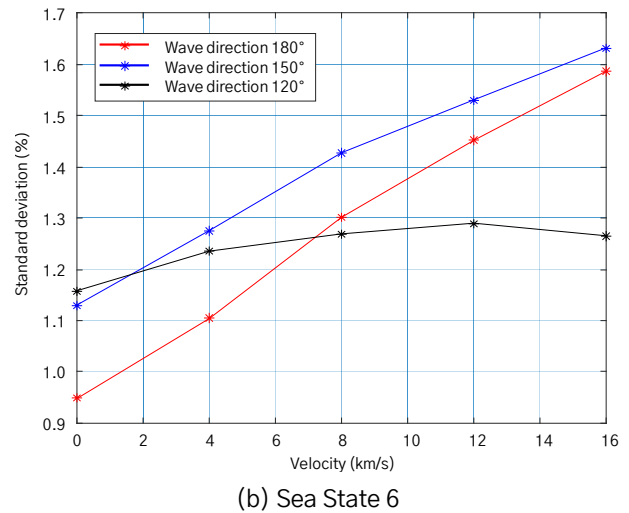
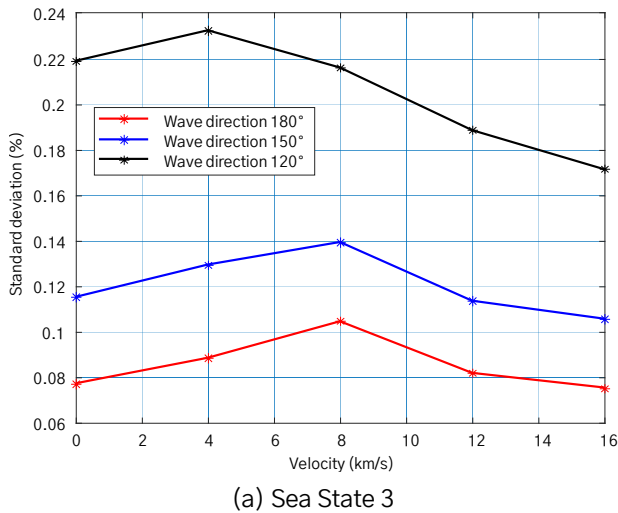


Fig. 4. Result of standard deviation according to wave direction

함에 따른 탐지 확률 변화의 분포를 분석하였으며, 그 결과는 Fig. 5와 같다.

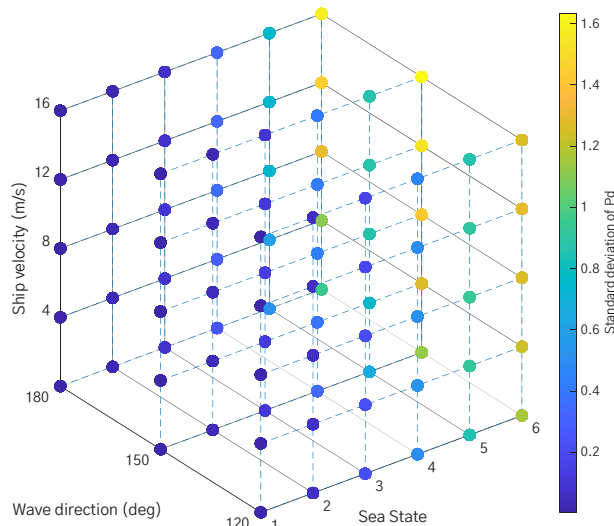


Fig. 5. Result of standard deviation according to condition

전반적으로 해상 상태가 증가함에 따라 표준편차가 커지는 경향을 보였으며, 특히 Sea State 6에서 함정이 16 m/s로 기동 중 파도가 150°로 진입했을 때 1.6320 %로 가장 큰 표준편차 값을 나타냈다. 또한 앞선 결과와 같이 Sea State 4까지 모든 파 진입 각도에 대해 속도가 증가함에 따라 표준편차가 증가하다가 감소하는 형태를 보였으며, Sea State 5와 Sea State 6에서 파 진입 각도가 180° 및 150°일 경우에는 함정 속도가 증가함에 따라 표준편차 역시 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이와 같이 모든 시나리오

에서 레이더의 운용 안정성에 대한 시뮬레이션 결과를 요약하면 Table 2와 같다.

추가적으로, 레이더의 성능은 일반적으로 탐지 확률 80 %를 기준으로 판단한다. 그에 따라 Table 2에서는 레이더의 운용 안정성(표준편차)을 검토하였다면, Table 3에서는 탐지 확률 기준 미만의 정도를 분석하였다.

분석 결과, 탐지 확률 80 %를 기준으로 설계한 레이더가 Sea State 4에서 함정 속도 150 m/s까지 모든 파 진입각에 따라 탐지 확률 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 반면, Sea State 6, 함정 속도 16 m/s에서 파 진입 각도가 150°일 때에는 약 15.8 %의 탐지 확률로 가장 높은 기준 미충족(80 % 미만) 빈도를 나타냈다. 또한 Sea State 4에서 파 진입 각도가 120°, 함정 속도가 4 m/s일 때 일시적으로 탐지 확률을 미충족하는 경우가 발생하였으며, Sea State 5에서 파 진입 각도가 180°일 경우에는 함정이 정지해 있을 때 4 m/s로 기동 중일 때보다 안정적인 운용 상태를 보였지만, 기준 미충족 발생 빈도가 높은 특징을 나타냈다.

본 연구의 결과는 함정에 탑재되는 레이더의 경우 함정의 기동 조건 및 해상 상태에 따른 함 요동을 고려하여 레이더 시스템 설계자 및 운용자가 마진 설정 기준을 정량적으로 제시할 수 있는 기반을 제공한다. 향후에는 함 요동 예측기의 구조 고도화, 실제 센서에 기반한 입출력 적용, 다중 표적 탐지 조건에서의 보상 안정성 분석 등으로 연구를 확장할 수 있을 것이다.

Table 2. Result of standard deviation according to condition

Sea State	Wave direction (deg)	Ship velocity (m/s)	Standard deviation (%)
1	180	0	0.0044
		4	0.0050
		8	0.0059
		12	0.0047
		16	0.0043
	150	0	0.0065
		4	0.0074
		8	0.0079
		12	0.0064
		16	0.0060
	120	0	0.0125
		4	0.0132
		8	0.0123
		12	0.0107
		16	0.0097
	2	180	0
4			0.0303
8			0.0356
12			0.0280
16			0.0256
150		0	0.0392
		4	0.0440
		8	0.0475
		12	0.0385
		16	0.0360
120	0	0.0744	
	4	0.0788	
	8	0.0735	
	12	0.0638	
	16	0.0582	
3	180	0	0.0771
		4	0.0884
		8	0.1047
		12	0.0817
		16	0.0752
	150	0	0.1152
		4	0.1294
		8	0.1393
		12	0.1135
		16	0.1056
120	0	0.2189	
	4	0.2323	
	8	0.2159	
	12	0.1885	
	16	0.1713	

Table 2. Result of standard deviation according to condition (Continued)

Sea State	Wave direction (deg)	Ship velocity (m/s)	Standard deviation (%)
4	180	0	0.2497
		4	0.2914
		8	0.3563
		12	0.3401
		16	0.3312
	150	0	0.3415
		4	0.3868
		8	0.4402
		12	0.4151
		16	0.4051
120	0	0.5021	
	4	0.5329	
	8	0.5312	
	12	0.4970	
	16	0.4655	
5	180	0	0.5190
		4	0.6019
		8	0.7310
		12	0.7472
		16	0.7610
	150	0	0.6679
		4	0.7569
		8	0.8593
		12	0.8727
		16	0.8688
120	0	0.8562	
	4	0.9232	
	8	0.9340	
	12	0.9014	
	16	0.8571	
6	180	0	0.9485
		4	1.1046
		8	1.3021
		12	1.4522
		16	1.5870
	150	0	1.1295
		4	1.2749
		8	1.4270
		12	1.5303
		16	1.6320
120	0	1.1576	
	4	1.2349	
	8	1.2688	
	12	1.2896	
	16	1.2649	

Table 3. Result of percentage of detection probability below 80 %

Sea State	Wave direction (deg)	Ship velocity (m/s)	$P_d < 0.8$ (%)
1	180	0	0
		4	0
		8	0
		12	0
		16	0
	150	0	0
		4	0
		8	0
		12	0
		16	0
	120	0	0
		4	0
8		0	
12		0	
16		0	
2	180	0	0
		4	0
		8	0
		12	0
		16	0
	150	0	0
		4	0
		8	0
		12	0
		16	0
	120	0	0
		4	0
8		0	
12		0	
16		0	
3	180	0	0
		4	0
		8	0
		12	0
		16	0
	150	0	0
		4	0
		8	0
		12	0
		16	0
	120	0	0
		4	0
8		0	
12		0	
16		0	

Table 3. Result of percentage of detection probability below 80 % (Continued)

Sea State	Wave direction (deg)	Ship velocity (m/s)	$P_d < 0.8$ (%)
4	180	0	0
		4	0
		8	0
		12	0
		16	0
	150	0	0
		4	0
		8	0
		12	0
		16	0
	120	0	0
		4	0.3333
8		0	
12		0	
16		0	
5	180	0	0.8611
		4	0.4722
		8	1.6667
		12	1.9167
		16	1.8889
	150	0	0
		4	0.9444
		8	3.0833
		12	3.4444
		16	3.2500
	120	0	1.9722
		4	3.6389
8		3.6111	
12		3.1111	
16		2.6389	
6	180	0	4.3333
		4	7.4444
		8	10.8333
		12	14.4167
		16	15.8889
	150	0	7.8889
		4	10.0278
		8	12.5278
		12	14.2778
		16	15.2222
	120	0	8.4167
		4	8.6389
8		9.8889	
12		9.611	
16		8.5833	

4. 결론

본 논문에서는 해상 상태, 함정 속도, 파도의 진입 각 등 실제 운용 조건에서 함정에 탑재된 레이더가 경험하는 성능 저하를 정량적으로 분석하기 위하여, 레이더 모델, 함정 요동 모델, 빔 조향 계산 모델을 통합한 시뮬레이션 기반 분석 도구를 구성하였다.

함정에 탑재된 레이더의 성능 저하 원인 중 하나인 함정 요동에 따른 안테나 조향각 증가는 안테나 패턴 손실을 증가시켜 SNR 감소 및 탐지 확률 저하로 이어진다. 본 연구에서는 해당 도구를 통해 다양한 해상 조건에 따라 탐지 확률의 변화(표준편차)를 분석하였다. 이때 탐지 확률 변화는 레이더 운용의 안정성을 의미한다. 먼저 해상 상태가 증가함에 따라 탐지 확률의 변화가 커짐을 보였으며, 현실적인 함정 기동을 고려한 해석 조건 내에서 전반적으로 파 진입 각도가 커질수록 함정의 요동이 커져 레이더 성능 변화가 심해짐을 볼 수 있었다. 함정 속도의 경우에도 Sea State 4 이하에서는 속도가 증가함에 따라 탐지 확률 변화가 커지다가 줄어드는 경향을 보였다. 나아가 탐지 확률 기준(80%)을 만족하지 못하는 경우를 살펴보면 Sea State 4, 파 진입 각도 120°, 함정 속도 4 m/s에서 처음으로 만족하지 못하는 경우가 발생하였으며, Sea State 6에서 파 진입 각도 150°, 함정 속도 16 m/s에서 최대 15.222%까지 나타나는 것을 볼 수 있었다.

이러한 분석 접근은 특히 미래형 지능형 센서 제어 기 설계 및 자율 운용 플랫폼에서 필수적인 기반 기술로 발전될 수 있으며, 함정 기반 레이더뿐만 아니라 항공기, 이동식 기지 등 요동에 대응하는 모든 플랫폼 기반 센서 시스템에 확장 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] J. H. Lee, S. H. Hwang, K. J. Kim, J. Y. Go, and H. G. Kim, "Analysis of Small Sea-surface Targets Detection Performance Using Low-altitude Surveillance Radar," *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, Vol. 23, No. 5, pp. 567-574, Oct. 2020.
- [2] M. N. Muralidhara, M. Kumar, V. Vinod, S. L. Sharath, and B. Dharani, "Quantitative Analysis of Effects of Ship's Roll and Pitch on Radar Target Detection Performance," *International Journal of Engineering Development and Research*, Vol. 8, No. 4, pp. 318-324, 2020.
- [3] M.-H. Park, J.-Y. Go, W.-J. Jeon, H.-S. Kim, S.-W. Kwon, S.-K. Lee, S.-H. Ryu, and S.-H. Kim, "Variation of Radar Performance by Ship Motion According to Sea State," *Journal of the Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, Vol. 32, No. 5, pp. 475-483, May 2021.
- [4] M. H. Park, H. S. Kim, W. J. Jeon, S. K. You, S. W. Kwon, H. W. Moon and K. W. Lee, "Development of Modeling & Simulation Tool for Long Range Radar Considering Operational Environment in Time Domain," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, Vol. 30, No. 7, pp. 591-602, Jul. 2019.
- [5] D. W. Tufts and A. J. Cann, "On Albersheim's Detection Equation," *IEEE Trans. Aerospace&Electronic Systems*, Vol. AES-19, No. 4, pp. 644-646, July 1983.
- [6] DNV, "SESAM User Manual: WASIM: Wave Loads on Vessels with Forward Speed," Det Norske Veritas, Høvik, Norway, DNV Report No. 2003-0209, 2014.
- [7] J. H. Yun, J. W. Paik, J. I. Park, K. C. Yoon, and K. S. Kim, "A Study of Motion Compensation for Electronic Beam on Sea Environments," *Journal of the Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, Vol. 33, No. 12, pp. 960-965, Dec. 2022.