

함정 대공방어시스템의 효과도를 활용한 피격성 추정 가능성 연구

이건희¹·윤석태¹·조용진^{2,†}
동의대학교 함정적외선신호연구소¹
동의대학교 조선해양공학과²

A Feasibility Study on the Estimation of a Ship's Susceptibility Based on the Effectiveness of its Anti-Air Defense Systems

GeonHui Lee¹·SeokTae Yoon¹·YongJin Cho^{2,†}
Ship Infra-Red Signature Center, Dong-Eui University¹
Naval Architecture and Ocean Engineering, Dong-Eui University²

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Recently, the increased use of anti-ship guided missiles, a weapon system that detects and attacks targets in naval engagement, has come to pose a major threat to the survivability of ships. In order to improve the survivability of ships in response to such anti-ship guided missiles, many studies of means to counteract them have been conducted in militarily advanced countries. The integrated survivability of a ship can be largely divided into susceptibility, vulnerability, and recoverability, and is expressed as the conditional probability, if the ship is hit, of damage and recovery. However, as research on susceptibility is a major military secret of each country, access to it is very limited and there are few publicly available data. Therefore, in this study, a possibility of estimating the susceptibility of ships using an anti-air defense system corresponding to anti-ship guided missiles was reviewed. To this, scenarios during engagement, weapon systems mounted to counter threats, and maximum detection/battle range according to the operational situation of the defense weapon system were defined. In addition, the effectiveness of the anti-air defense system and susceptibility was calculated based on the performance of the weapon system, the crew's ability to operate the weapon system, and the detection probability of the detection/defense system. To evaluate the susceptibility estimation feasibility, the sensitivity of the detailed variables was reviewed, and the usefulness of the established process was confirmed through sensitivity analysis.

Keywords : Survivability(생존성), Conditional probability(조건부 확률), Susceptibility(피격성), Susceptibility estimation(피격성 추정법), Anti-air defense system(대공방어시스템)

1. 서론

목표물을 탐지하고 피격하는 무기체계인 대함 유도탄은 1950년부터 개발되어 실제 교전에 운용되었다. 1967년 구 소련제 스틱스(styx) 함대함 유도탄에 의해 이스라엘 함정이 격침되는 사건, 1982년 포클랜드(Falklands) 전쟁과 1987년 이란-이라크 전쟁에서 영국 해군 함정과 미 해군 함정이 엑조셋(exocet) 유도탄에 의해 격침되는 사건이 있었다 (Jeong et al., 2006). 이

와 같은 역사적 사건들을 통해 점점 대함 유도탄을 이용한 교전으로 양상이 변화하였고, 이에 해군 함정이 피격을 당하게 되면서 대함 유도탄의 위력이 증명되었다. 이에 따라 대함 유도탄의 과학 기술이 점차 발전하게 되면서 활용성이 증대되었다. 그 결과 대함 유도탄은 함정의 생존성을 저해하는 주된 위협 요소가 되었다 (Kim et al., 2011).

통합 생존성은 주어진 임무의 완수를 위해 적의 위협으로부터 견딜 수 있는 능력으로 정의된다. 함정의 통합 생존성은 크게 피

격성(susceptibility), 취약성(vulnerability), 회복성(recoverability)으로 구분할 수 있다. 피격성은 적의 탐지 센서나 위협 무기에 노출되어 피격당할 확률을 뜻하며, 함정의 능동적인 방어능력을 나타내는 척도로 사용된다. 취약성은 위협 무기에 의해 피격을 받는다는 조건부 확률로서 함정의 수동적 방어능력을 나타내는 척도이다. 회복성은 위협 무기에 의한 직, 간접적인 효과에 의해 손상이 발생한다는 조건부 확률(취약성)하에 신속하게 회복하여 함정이 임무를 지속적으로 수행할 수 있도록 하는 함정 시스템 및 승조원에 의한 손상을 회복 능력을 뜻한다. 통합 생존성은 대함 유도탄의 위협으로부터 함정의 생존성을 높이기 위하여 함정을 설계할 때 가장 먼저 고려되어야 할 필수 요소가 되었다.

이러한 이유로 최근 들어 함정의 통합 생존성 향상을 위한 다양한 연구가 소개되고 있다. 먼저, 생존성과 관련한 연구는 현재 생존성 분석 기술의 수준을 검토하고 확률론적 방법을 토대로 생존성을 정량화하는 방법 (Brett et al., 2017), 함정의 통합 생존성 분석을 위해 이론적인 절차적 방법론을 제시한 연구 (Kim et al., 2010) 등이 있다. 그리고 취약성과 관련한 연구로는 위협 무기의 관통 효과를 고려하여 취약성 계산 절차를 제시한 연구 (Kim et al., 2014), 칼튼 손상 함수를 이용하여 주요 장비의 취약 면적을 산정하고 취약성을 평가하는 연구 (Lee et al., 2018) 등이 있다.

이 밖에도 회복성과 관련한 연구는 M&S를 통한 함정의 침수 상황을 가시화하여 복원성을 계산하는 손상통제기법 연구 (An et al., 2007), 사고의 근본적인 원인을 파악하고 이를 제거하기 위해 위험기반 접근법을 활용하여 함정의 생존성을 평가한 연구 (Kang et al., 2009) 등이 있으며, 피격성과 관련한 연구로는 대함 미사일(ASCMs)의 공격에 대하여 함정에 탑재된 하드 킬(hard kill)과 소프트 킬(soft kill)을 고려하여 방어 효과를 평가한 연구 (Bradford et al., 1992), 함정의 대공방어시스템 효과를 분석한 연구 (Johns et al., 1996) 등이 있다.

지금까지 피격성과 관련한 자료는 각국의 보안 수준이 높은 군사 비밀로 관리되고 있어 접근이 매우 어려워 공개된 자료가 부족한 실정이다.

하지만 함정의 통합 생존성을 분석하는 측면에서 위협 무기체계에 대하여 탑재된 무기체계를 고려하고 함정의 피격성을 추정하는 방법이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 함정의 대공방어 시스템을 이용하여 확률적으로 함정의 피격성을 추정할 수 있는 가능성을 검토하였다. 이를 위해 선행연구자료 (Johns et al., 1996)를 기반으로 무기체계의 성능, 탐지 체계의 탐지 확률 등의 변수를 이용해 대공방어시스템 효과도를 계산하였다. 그리고 함정의 대공방어시스템 효과도의 여집합 확률을 이용하여 피격 확률을 계산하였으며, 세부변수 민감도 분석을 통해 피격 확률 추정 가능성을 확인하였다.

2. 대공방어시스템과 피격성

통합 생존성의 조건부 확률 개념을 Fig. 1에 보였다. 함정의

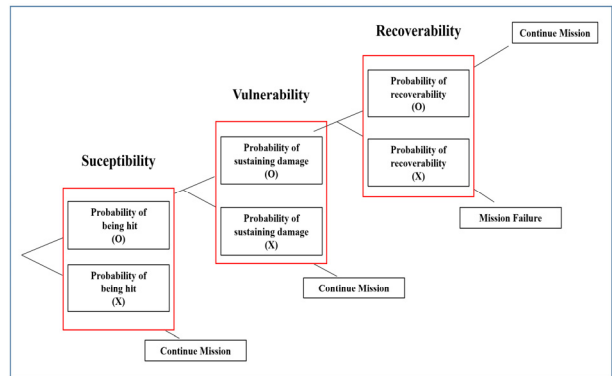


Fig. 1 Survivability as a conditional probability of susceptibility, vulnerability and recoverability

통합 생존성은 대함 유도탄에 의해 함정의 피격 여부를 확인하고 다음으로 손상 여부, 회복 가능 여부 단계까지의 조건부 확률 (Brett et al., 2017)을 통해 판단한다.

그 중 함정의 피격성은 조우하고($P(E_c)$) 교전을 시작해서 ($P(E_n)$) 공격당할 확률($P(H)$)을 의미하며, $P(S)$ 로 나타낸다. 이는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P(S) = P(E_c) \times P(E_n) \times P(H) \tag{1}$$

본 논문에서는 $P(E_c)=P(E_n)=0.10$ 이라고 가정하였으며, 결국 $P(S)$ 는 다음과 같다.

$$P(S) = P(H) \tag{2}$$

또한 $P(H)$ 는 적의 위협 무기를 제거할 수 있는 확률의 여집합으로 나타낼 수 있다.

$$P(H) = 1 - P(\bar{H}) \tag{3}$$

$P(\bar{H})$ 는 적의 대함유도탄을 하드 킬(hard kill)과 소프트 킬(soft kill)의 요격 확률 또는 본 함정이 가진 대공방어시스템의 효과적 방어 확률로서 이는 시스템 효과도를 표현한다고 볼 수 있다. 이를 이용하여 대공방어시스템 효과도의 여집합으로 피격성을 추정하였다.

2.1. 시나리오

우선 해군 함정에는 대함 유도탄을 방어하기 위해 여러 대공방어시스템을 탑재하고 있다. 이를 이용해 함정은 대함 유도탄과 교전 시 탑재하고 있는 방어 시스템의 사거리를 고려하여 적 위협에 대응하며, 이를 레이어드 디펜스(layerd defence) 방식이라 한다 (Gang, 1994). 함정의 대공방어시스템은 missile, gun, CIWS(close-in weapon system)와 같은 하드 킬 그리고 chaff와 ECM(electronic counter measures)과 같은 소프트 킬로 구성되며, 본 연구에서 고려한 방어 시스템을 Table 1에 정리하였다.

본 연구에서 고려한 방어 시스템을 이용하여 함정의 피격성을

Table 1 Anti-air defense system

Defense System		Armament
Hard kill	Missile	NATO Seasparrow Missile System
	Gun	Mk 45 5"/54 Gun
	CIWS	MK 15 Phalanx
Soft kill	ECM	SLQ-32A (V)3
	Chaff	MK36 Decoy Launching System

계산하기 위해서는 대공방어시스템의 신뢰성, 운용성 그리고 적 중률과 같은 요소들을 고려해야 한다. 그러나 이와 같은 세부 요소들의 정보는 비밀 자료로 분류되어 정확한 방어 시스템의 피격성을 계산하는 것이 어려운 실정이다. 따라서 본 연구에서는 다음과 같은 시나리오를 가정하여 피격성을 계산하였다.

- (1) 함정은 오직 한발의 대함 유도탄 위협을 받는다.
- (2) 대공방어시스템(missile, gun, CIWS, chaff, ECM)은 대함 유도탄과 한 번씩만 교전한다.
- (3) 각각의 방어 시스템들은 독립적인 요격 확률을 갖는다.
- (4) 대공방어시스템의 성능은 대함 유도탄이 처음 탐지되는 거리(interval)에 따라 달라진다.
- (5) 탐지(detection), 통제(control) 그리고 교전(engagement)과 같은 연속적인 하위 시스템을 고려하였다.

2.2. 운용 상황

함정의 방어 시스템은 적의 위협을 탐지하고 데이터 처리를 거쳐 교전 시스템까지 신호를 전달하며, 이를 Fig. 2에 보였다.

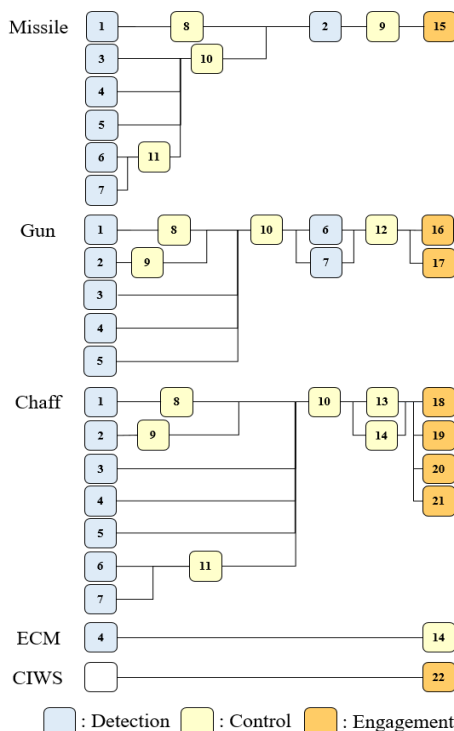


Fig. 2 System state

Fig. 2과 같이 함정의 방어 시스템은 탐지(detection), 데이터 통제(control) 그리고 교전(engagement) 순으로 각 시스템의 운용 여부를 판단하여 차례대로 작동한다. 탐지부터 교전까지 진행되는 절차를 state로 정의하였다.

대공방어시스템의 성능은 대함 유도탄이 처음 탐지되는 범위에 따라 달라진다. 유도 무기에 대한 함정의 미사일 탐지 범위 및 교전 범위를 interval로 정의했으며, interval에 대한 개념을 Fig. 3에 보였다.

Fig. 3에서 DI 는 대함 유도탄을 탐지할 수 있는 탐지 구간(detection interval)을 뜻하고, EI 는 탐지 후 방어 시스템의 교전 구간(engagement interval)을 뜻한다. 이를 통해 대함 유도탄의 탐지 거리와 방어 시스템의 교전은 상관관계가 있다는 것을 알 수 있다. 이러한 구간들은 함정에 탑재된 무기체계마다 다르다.

missile, gun, chaff는 탐지 시스템에 따라 최대 탐지 거리와 효율이 달라진다. 본 연구에서는 여러 개의 탐지 시스템 중 초기 탐지 범위가 가장 큰 시스템(1, 2, 3)를 이용했으며, Fig. 2에서 탐지 시스템에 따른 무기체계의 운용 상황을 정리하여 Fig. 4에 보였다.

Fig. 4에서 탐지 시스템에 따른 초기 탐지 범위에 대한 개념을 Fig. 5에 보였고 각 state의 계산은 다음 식 (4)와 같다.

$$State_j = S_{Mj} * S_{Gj} * S_{CHj} * S_E * S_C \quad (j = 1, \dots, 7) \tag{4}$$

여기서, $S_M, S_G, S_{CH}, S_E, S_C$ 는 missile, gun, chaff, ECM,

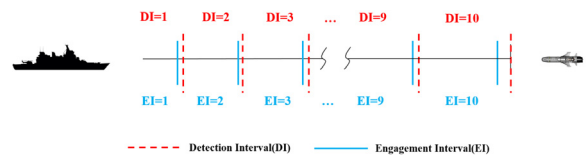


Fig. 3 Detection and engagement interval

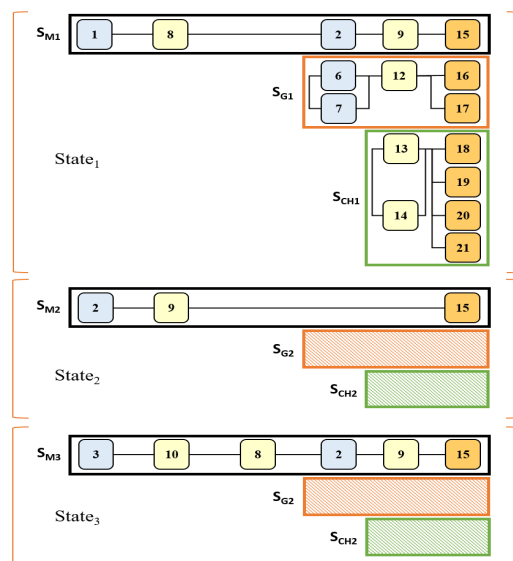


Fig. 4 Three detection paths corresponding to states 1, 2, 3

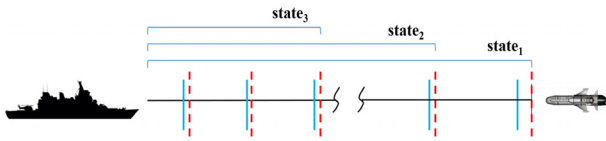


Fig. 5 Interval of state according to subsystem

CIWS 각각의 절차를 나타내며, 탐지부터 교전까지 모든 하위 시스템을 사용한다는 것을 의미한다.

Fig. 5와 식 (4)을 참고하여 주요 탐지를 1번 시스템으로 설정한 state₁의 교전 경로는 다음 식 (5)과 같고, S_M은 하위 시스템(U_i, Unit)들의 운용 상황을 고려하여 다음 식 (6)과 같이 계산한다.

$$State_1 = S_M * S_{G1} * S_{CM} * S_E * S_C \quad (5)$$

$$S_M = U_1 * U_8 * U_2 * U_9 * U_{15} \quad (6)$$

$$S_{G1} = (U_6, U_7) * U_{12} * (U_{16}, U_{17}) \quad (7)$$

$$S_{CM} = (U_{13}, U_{14}) * (U_{18}, U_{19}, U_{20}, U_{21}) \quad (8)$$

여기서, U_i는 각각의 요소를 계속해서 사용할 수 있는 확률로 정의한다. state₁은 하위 시스템으로 탐지 시스템 U₁를 사용하고 통제 시스템 U₈를 지나 최종적으로 교전 시스템 U₁₅를 사용하는 것을 나타낸다. (U₆, U₇)은 괄호 안에 있는 구성 요소 중 적어도 하나는 사용할 수 있어야 함을 의미한다.

그리고 또 다른 절차인 state₂는 통제 시스템 U₈를 사용할 수 없어(U₈) 시스템 U₂를 우선으로 고려하는 상황으로, 다음 식 (9)과 같이 나타낸다.

$$S_{M2} = \overline{U_8} * U_2 * U_9 * U_{15} \quad (9)$$

S_{Gj}과 S_{CHj}는 missile의 탐지 시스템을 공유하여 사용하기 때문에 state에 따라 달라지지 않는다.

마지막 state₃는 탐지 시스템 U₁를 사용할 수 없어(U₁) 시스템 U₃를 고려하는 상황으로 앞선 state₁, state₂와 같은 방식으로 나타낸다.

$$S_{M3} = \overline{U_1} * U_3 * U_{10} * U_8 * U_2 * U_9 * U_{15} \quad (10)$$

S_E와 S_C는 독립적인 무기체계로 missile, gun 및 chaff의 탐지 시스템을 공유하지 않는다. 따라서 S_E와 S_C는 state마다 동일하게 사용된다.

$$S_E = U_4 * U_{14} \quad (11)$$

$$S_C = U_{22} \quad (12)$$

결과적으로, state는 S_{Mj}의 하위요소들이 운용되는 상황에 따라 다른 값을 갖는다.

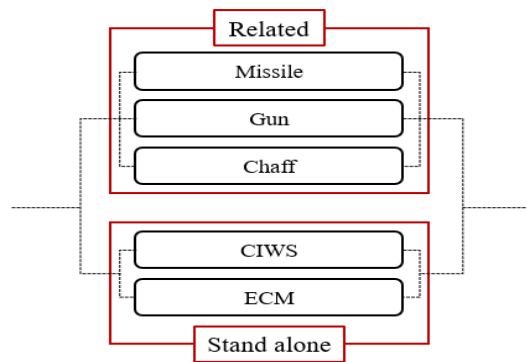


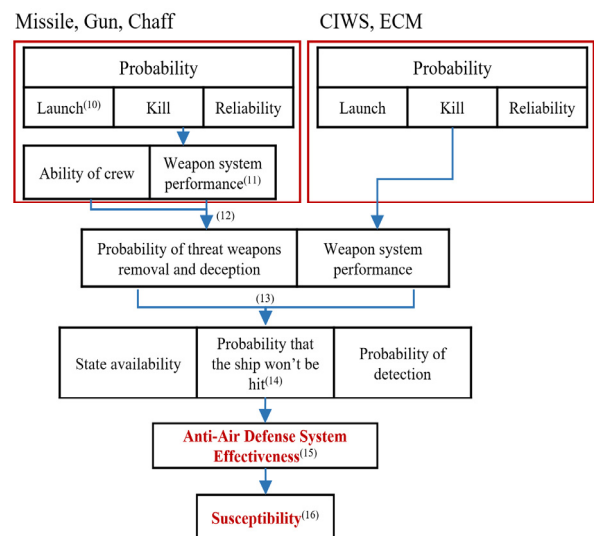
Fig. 6 The two engagement processing paths

무기체계 운용 시 상호 연관 작용이 있는 무기체계와 독립적인 무기체계를 구분하는 것은 Fig. 6에서 볼 수 있다. 이러한 분류를 통해 대공방어시스템의 선택 가능한 교전 경로를 파악할 수 있을 뿐만 아니라 피격 확률을 효과적으로 계산할 수 있다.

3. 대공방어시스템을 활용한 피격 확률

함정의 피격성은 상호 연관 작용이 있는 missile, gun, chaff 그리고 독립적으로 작동하는 ECM과 CIWS로 구분하고 각 시스템의 운용 확률을 고려하여 계산한다. Fig. 7에 대공방어시스템의 피격성을 계산하기 위한 절차를 보였다.

대공방어시스템의 무기체계 성능은 각각의 발사 확률, 요격 확률 그리고 신뢰도를 사용하여 계산한다. 이후 무기체계를 운용하는 승조원들의 운용 능력을 고려하여 적 위협 무기의 요격 확률 및 기만 확률을 구한다. 그리고 최종적으로 무기체계 하위 시스템의 운용 상황에 따른 state 가용성과 탐지 거리에 따른 탐지 확률을 고려하여 대공방어시스템의 효과도(system effectiveness, SE)와 피격 확률을 구할 수 있다.



() : Equation number in section 3.1 used in the process of estimating the susceptibility

Fig. 7 Susceptibility estimation method

3.1 대공방어시스템 효과도 및 피격 확률 계산 절차

피격성 추정 절차는 대공방어시스템의 발사부터 대함 유도탄의 요격까지 무기체계 성능을 먼저 계산한다. 여기서 발사 확률(probability of Launch, P_L), 신뢰도(Reliability, R) 그리고 요격 확률(probability of kill, P_K)이 사용된다 (Hong et al., 2011). 이는 각각 발사체를 발사할 확률, 대함 유도탄을 향해 발사체가 발사된 후 요격하기까지 정상적으로 임무를 수행하는 확률 (Ha, 2022) 그리고 대함 유도탄을 요격할 확률을 뜻한다.

무기체계의 발사 확률은 대함 유도탄 1기당 요격 미사일 2기를 발사하는 방법 (Seo et al., 2020)을 기본으로 가정하였으며, 다음 식 (13)과 같이 나타낸다.

$$P_{L,M}(1) = 8P_M \cdot (1 - P_M)^7 \quad (13)$$

$$\begin{aligned} P_{L,M}(2) &= 1 - [P_{L,M}(0) + P_{L,M}(1)] \\ &= 1 - [(1 - P_M)^8 + 8P_M \cdot (1 - P_M)^7] \end{aligned}$$

$$P_{L,G}(1) = 2P_G \cdot (1 - P_G)$$

$$\begin{aligned} P_{L,G}(2) &= 1 - [P_{L,G}(0) + P_{L,G}(1)] \\ &= 1 - [(1 - P_G)^2 + 2P_G \cdot (1 - P_G)] \\ &= P_G^2 \end{aligned}$$

$$P_{L,CH}(1) = 24P_{CH} \cdot (1 - P_{CH})^{23}$$

$$\begin{aligned} P_{L,CH}(2) &= 1 - [P_{L,CH}(0) + P_{L,CH}(1)] \\ &= 1 - [(1 - P_{CH})^{24} + 24P_{CH} \cdot (1 - P_{CH})^{23}] \end{aligned}$$

식 (13)을 이용하여 계산한 각 무기체계들의 발사 확률과 각각의 신뢰도 및 요격 확률을 이용하여 무기체계 성능을 계산하였으며, 이는 다음 식 (14)과 같다. 식 (14)의 missile, gun 그리고 chaff의 ET 는 각각 m , g 그리고 ch 로 정의하였다.

$$\begin{aligned} P(M_{mj}) &= [P_{L,M}(1) \cdot P_{K,mj}(1) \cdot R_M] \\ &\quad + [P_{L,M}(2)(P_{K,mj}(2) \cdot R_M^2 \\ &\quad + 2P_{K,mj}(1) \cdot R_M \cdot (1 - R_M))] \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} P(G_{gj}) &= [P_{L,G}(1) \cdot P_{K,gj}(1) \cdot R_G] \\ &\quad + [P_{L,G}(2)(P_{K,gj}(2) \cdot R_G^2 \\ &\quad + 2P_{K,gj}(1) \cdot R_G \cdot (1 - R_G))] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P(CH_{chj}) &= [P_{L,CH}(1) \cdot P_{K,chj}(1) \cdot R_{CH}] \\ &\quad + [P_{L,CH}(2)(P_{K,chj}(2) \cdot R_{CH}^2 \\ &\quad + 2P_{K,chj}(1) \cdot R_{CH} \cdot (1 - R_{CH}))] \end{aligned}$$

CIWS와 ECM은 독립적인 무기체계로 각각 승조원의 영향을 받지 않는다. 따라서 state만을 고려하여 무기체계 성능을 계산하였으며, 이를 각각 $P(CIWS_j)$ 와 $P(ECM_j)$ 로 하였다.

이와 반대로 탐지 및 운용 시스템을 공유하는 missile, gun 그리고 chaff는 승조원의 능력을 고려하여 위협 무기 제거 및 기만 확률($P_K(M_{ij})$, $P_K(G_{ij})$ 그리고 $P_K(CH_{ij})$)를 계산하였으며, 다음 식 (15)와 같다. 이는 각 무기체계의 ET 에 따른 성능

그리고 승조원의 DI 와 ET 에 따른 운용 능력(P_{CREW})이 반영된 것이다.

$$P_K(M_{ij}) = \sum_m P(M_{mj}) \cdot P_{CREW(M)_{mj}} \quad (15)$$

$$P_K(G_{ij}) = \sum_g P(G_{gj}) \cdot P_{CREW(G)_{gj}}$$

$$P_K(CH_{ij}) = \sum_{ch} P(CH_{chj}) \cdot P_{CREW(CH)_{chj}}$$

앞서 계산된 모든 무기체계들의 위협 무기 제거 및 기만 확률을 고려하여 함정이 피격을 당하지 않을 확률을 계산할 수 있다. missile, gun과 chaff를 사용했을 때 위협 무기 제거 및 기만 실패 확률(Q_{ij})와 CIWS와 ECM을 사용했을 때 위협 무기 제거 및 기만 실패 확률(Q_j)를 다음 식 (16)과 같이 계산한다.

$$\begin{aligned} Q_{ij}(M, G, CH) &= (1 - P_K(M_{ij})) \cdot (1 - (P_K(G_{ij})) \\ &\quad \cdot (1 - P_K(CH_{ij}))) \end{aligned} \quad (16)$$

$$Q_j(C, E) = (1 - P(CIWS_j)) \cdot (1 - P(ECM_j))$$

식 (16)을 이용하여 대함 유도탄의 위협을 제거하고 기만할 확률, 즉 함정이 피격당하지 않을 확률($P(E_o|Detect_{ij}, State_j)$)은 다음 식 (17)를 이용하여 계산한다.

$$\begin{aligned} P(E_o|Detect_{ij}, State_j) &= 1 - [Q_{ij}(M, G, CH) \\ &\quad \cdot Q_j(C, E)] \end{aligned} \quad (17)$$

여기서, E_o 는 DI 가 i 이고 state가 j 일 때 함정이 피격을 당하지 않을 사건을 뜻한다.

대공방어시스템 효과도는 각 state에서 사용되는 하위 시스템들의 가용성($P(State_j)$), 탐지 시스템의 DI 에 따른 탐지 확률($P(Detect_{ij})$) 그리고 식 (17)와 함께 고려하여 계산하며, 이는 다음 식 (18)와 같다.

$$\begin{aligned} SE &= \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^N P(E_o|Detect_{ij}, State_j) \\ &\quad \cdot P(Detect_{ij}) \cdot P(State_j) \end{aligned} \quad (18)$$

대공방어시스템 효과도는 무기체계의 시스템 state가 정상적으로 작동될 때 대함 유도탄을 탐지하고, 무기체계를 사용하여 적의 위협을 제거하여 함정이 피격을 당하지 않을 확률을 조건부 확률로 나타낸 것이다.

최종적으로 함정의 피격성, 즉 피격 확률은 모든 사건이 일어날 확률 1에서 대공방어시스템 효과도의 여집합으로 정의되며, 이는 식 (19)과 같이 나타낸다.

$$P(S) = 1 - SE \quad (19)$$

3.2 피격 확률 계산 및 분석

본 절에서는 피격성 추정 절차에 사용된 변수들의 수치를 설

명하고, 수치 변화에 따른 각 변수들의 민감도를 확인하여 본 연구에서 정립된 피격성 추정 방법의 신뢰성을 검토하였다.

피격성 계산을 위해 필요한 무기체계들의 성능은 군사 비밀로 취급되어 정확한 수치를 결정하기 어렵다. 따라서, 선행연구자료 (Johns et al., 1996)를 참고하여 수치를 설정하였다.

먼저, 식 (10)의 무기체계 발사 확률과 식 (11)의 무기체계 성능을 계산하기 위한 변수들의 수치를 Table 2에 정리하였다.

상호 연관 작용이 있는 무기체계(missile, gun, chaff)는 교전 시 실질적으로 무기체계를 운용하는 승조원의 능력이 중요하며, DI 와 EI 의 변화에 따른 수치를 Table 3에 정리하였다.

Table 2과 3의 정보를 이용하여 식 (12)의 위협 무기 제거 및 기만 확률, 식 (13)의 위협 무기 제거 및 기만 실패 확률 그리고 식 (14)의 함정이 피격당하지 않을 확률을 계산할 수 있다.

SE 를 계산하기 위해서는 각 state에 따른 하위 시스템의 가용성을 고려하여야 한다. 가용성은 식 (1)과 각 하위 시스템들의 정보($A(U_i)$)를 이용하여 계산하며, 이에 필요한 수치를 Table 4에 정리하였다.

Table 2 Probability of successfully firing and reliability

Probability of Successfully Firing			Reliability		
P_M	P_G	P_{CH}	R_M	R_G	R_{CH}
0.9	0.9	0.9	0.9	0.98	0.98

Table 3 Ability of the crew

$State_1$							
$DI \backslash EI$	$P_{CREW(M)_{mi}}$		$P_{CREW(G)_{gi}}$		$P_{CREW(CH)_{chi}}$		
	4	5	4	5	5	6	7
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.8	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.2	0.8	0.3	0.7	0.7	0.0	0.0
6	0.1	0.9	0.2	0.8	0.2	0.7	0.0
7	0.1	0.9	0.1	0.9	0.1	0.2	0.7
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2
9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Table 4 Equipment availability

Unit	
U_i	Availability ($A(U_i)$)
1, 2, 3, 8, 10	0.980
4, 9, 15	0.985
5, 6, 7, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22	1.000

State의 가용성을 계산하기 위한 식 (1)~(9)와 Table 4의 정보를 통해 얻은 결과를 Table 5에 정리하였다. state의 가용성은 탐지, 통제 그리고 교전까지의 시스템을 순차적으로 고려하여 계산한다. 따라서 각 시스템의 운용 여부 및 성능에 따라 크게 달라진다.

Table 5에서 각 state의 가용성은 탐지 시스템의 성능에 크게 변화하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 사용되는 탐지 시스템의 DI 와 그에 따른 탐지 확률 역시 중요하며, SE 를 계산하기 위한 수치를 Table 6에 정리하였다.

Table 4의 정보를 이용하여 각 state의 가용성을 계산하고, Table 5와 6의 정보를 이용하여 식 (15)의 SE 를 계산할 수 있다. 그리고 최종적으로 계산된 SE 와 식 (16)을 이용하여 본 함의 피격성을 계산하였으며, 이를 Table 7에 정리하였다.

Table 5 Availability of the state

$State_1$	$State_2$	$State_3$
0.8995	0.0187	0.0176

Table 6 Probability of detection

$P(Detect_{ij})$			
DI	$State_1$	$State_2$	$State_3$
1	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00
5	0.00	0.10	0.20
6	0.10	0.40	0.40
7	0.30	0.40	0.30
8	0.50	0.10	0.10
9	0.10	0.00	0.00
10	0.00	0.00	0.00

Table 7 Anti-air defense system effectiveness

System Effectiveness			
DI	$State_1$	$State_2$	$State_3$
1	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00
5	0.00	0.007	0.003
6	0.08	0.007	0.006
7	0.26	0.007	0.005
8	0.20	0.0005	0.0005
9	0.03	0.00	0.00
10	0.00	0.00	0.00
SE_j	0.57	0.016	0.015
SE	0.60		
$Susceptibility$	0.40		

Table 7에서 각 state에 따른 SE를 계산하고 이를 총합하여 최종 SE는 0.60이 되고, 식 (16)을 이용해 함정의 피격성은 0.4가 된다. 앞서 설명한 바와 같이 SE는 탐지 시스템의 운용 여부 및 능력에 큰 영향을 받는다. 따라서 Table 7의 SE는 Table 6에 영향을 받아 0 또는 그 이상의 값을 갖는다. 그리고 state 4 이상의 가용성은 0에 근사하여 본 연구에서는 이를 고려하지 않았다.

본문에서 정리한 피격성 추정 방법을 타당성을 검증하기 위해 무기체계 요격 확률(P_K)의 변화에 따른 피격성을 계산하였으며, 이 결과를 Fig. 8과 Fig. 9에 각각 보였다. 이는 선행연구에서 제시한 수치를 기본으로 하였으며, 각 무기체계의 P_K 만을 변화시켜 계산한 결과이다.

Fig. 8은 탐지 시스템을 공통으로 사용하여 상호 연관 작용이 있는 missile, gun 그리고 chaff의 P_K 에 따른 피격성의 결과를 나타낸 것이다. 이 때, 각 무기체계의 P_K 는 E/I에 상관없이 고정된 상수로 설정하였다.

Fig. 8에서 missile과 gun의 P_K 향상에 따른 피격성의 변화가 거의 동일한 결과를 보여주며, 최소 37%에서 최대 41%로 약 4%의 차이를 보였다. 이와 반대로 chaff는 P_K 에 따라 피격성의 매우 큰 차이를 보였으며, 최소 34%에서 최대 49%로 약 15% 변화하였다. 이를 통해 missile과 gun 성능 향상보다 chaff 성능 향상이 함정의 피격성에 더 큰 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있다.

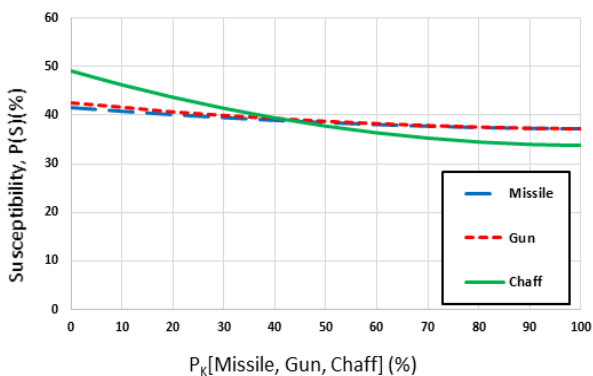


Fig. 8 Change in the susceptibility according to the killing probability of missile, gun and chaff

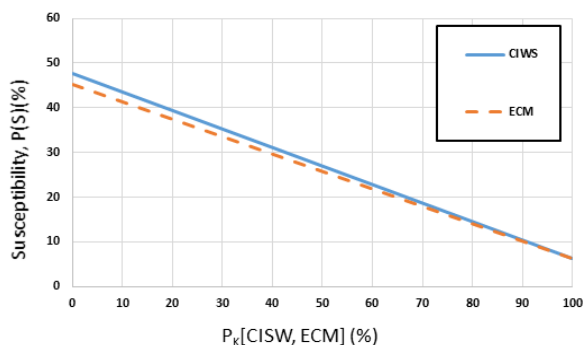


Fig. 9 Change in the susceptibility according to the killing probability of CIWS and ECM

Fig. 9는 독립적으로 운용되는 CIWS와 ECM의 P_K 변화에 따른 피격성의 결과를 나타내는 것으로 선형적으로 변하는 것으로 확인할 수 있다. 이는 상호 작용 연관 작용이 있는 무기체계와 달리 승조원 능력 등 따로 고려되는 것 없이 독립적으로 사용되어 나타난 결과이다. 또한 P_K 가 낮은 확률에서의 피격성의 차이는 선행연구의 초기 설정값이 상이해 발생한 결과이다.

Fig. 8과 Fig. 9에서 P_K 의 증가에 따른 피격성이 감소하여 변하는 것을 나타냈으며, 이를 통해 본 연구에서 정리한 피격성 추정 방법이 타당하다는 것을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 함정에 탑재된 대공방어시스템의 효과도를 활용하여 피격 확률의 추정 가능성에 관한 연구를 수행하였다. 그리고 대함 유도탄에 관한 함정의 방어 무기체계의 요격 확률 변화에 따른 함정의 피격 확률을 확인함으로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 상호 연관 작용이 있는 무기체계는 함정의 피격 확률이 비선형적으로 변화하는 것을 확인하였으며, 이와 반대로 독립적인 무기체계는 선형적인 관계를 갖는 것으로 확인되었다.

둘째, 비선형적인 관계를 갖는 무기체계 중 Missile과 gun은 거의 동일한 효과를 보였고 최소 37%, 최대 41%로 4%의 성능 차이를 보였다. 그리고 chaff는 최소 34% 최대 49%로 15%의 차이를 보여 함정의 피격성에 큰 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

셋째, 선형적인 관계를 갖는 CIWS와 ECM은 요격 확률 변화에 따라 최소 7%에서 최대 47%로 40%의 매우 큰 성능 차이를 보였다.

넷째, 무기체계의 요격 확률이 증가함에 따라 함정의 피격 확률이 감소되는 것을 확인하였으며, 이러한 관계를 토대로 본 연구에서 대공방어시스템 효과도를 응용하여 함정의 피격 확률을 추정할 수 있음을 확인하였다.

위와 같은 결론은 재래식 무기체계와 매우 제한된 정보를 통해 도출된 것이다. 따라서 최신식의 대공방어시스템과의 차이를 보일 것이다. 이러한 이유로 향후 연구에서는 현대식 무기체계를 반영하고 보다 정확한 정보를 수집하여 추후 국내 함정의 피격 확률을 추정에도 적용할 수 있도록 연구가 필요하다고 판단된다.

References

- Brett, J., Gamble, G., Reid, W. and Smith, S. 2017. *Integrated survivability analysis of naval platforms in high threat environments*. Defence Science and Technology Group, Australia.
- Gang, D.G., 1994. Layered air defense weapon system

- at sea, Defense and Technology. *Korea Defense Industry Association*, 2(180), pp.50–65.
- Ha, S.C., 2022. Study on weapon system operation reliability assessment using development reliability goals. *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 23(5), pp.225–231.
- Hong, W.Y., Jeong, S.M., Lee, S.E. and Oh, W.C. 2011. *Navy weapon system engineering*, Sejongbooks.
- Jeong, J.H., Lee, H.Y., Yu, J.M., Cho, D.S., Park, S.I., Im, G.H. and Park, J.G. 2006. The necessity of developing ship survivability design technology and the direction of development of related domestic technology. *Bulletin of the Society of Naval Architects of Korea*, 43(150), pp.1225–1178.
- Johns, Richard O. 1996. *AAW effectiveness of the DD-963 spruance class destroyer: an analytic approach*, Monterey, California, Naval Postgraduate School.
- Kang, H.J., Shin, J.G., Lee, D.K. and Choi, J. 2009. A study on deception ship for ship susceptibility improvement based on system engineering approach. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 46(3), pp.313–324.
- Kim, J.I., Jung, Y.R., Kim, H.S., Kim, C.H. and Yu, C.W. 2010. A study on the defense effectiveness of surface ships against diverse anti-surface missile attack strategies. *Journal of the Korea Society of Systems Engineering*, 1(6), pp.33–39.
- Kim, K.S. and Lee, J.H. 2014. Integrated survivability assessment given multiple penetration hits. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 28(1), pp.69–76.
- Kim, D.H., Yun, J.S. and Ryoo, C.K. 2011. Defense strategy against multiple anti-ship missiles using anti-air missiles, *Journal of Astronomy and Space Science*, 39(4), pp.354–361
- Seo, M.S. and Ma, J.M. 2020. A study on intercept probability and cost based multi-layer defense interceptor operating method using mathematical model. *Journal of the Korea Society for Simulation*, 29(6), pp.49–61.

