

# A Study on Operation Concept of Naval Surface to Air Defense System with Complex Assets

Taegu Kim<sup>\*†</sup> · Woongjae Na<sup>\*</sup> · Seoyeon Yang<sup>\*</sup> · Yeojin Park<sup>\*</sup> · Donghyuk Shim<sup>\*\*</sup> · Da-Bin Ryu<sup>\*\*</sup>  
Nahae Yun<sup>\*\*</sup> · In-Chul Park<sup>\*\*</sup> · Lae-Eun Kim<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup>Department of Industrial and Management Engineering, Hanbat National University  
<sup>\*\*</sup>LIG Nex1

## 함대공 방어체계 복합자산 운용개념 연구

김태구<sup>\*†</sup> · 나웅재<sup>\*</sup> · 양서연<sup>\*</sup> · 박여진<sup>\*</sup> · 심동혁<sup>\*\*</sup> · 류다빈<sup>\*\*</sup> · 윤나혜<sup>\*\*</sup> · 박인철<sup>\*\*</sup> · 김래은<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup>한밭대학교 산업경영공학과  
<sup>\*\*</sup>LIG Nex1

The purpose of this study was to propose an operational concept for a ship in a fleet equipped with an interceptor missile system, a naval surface to air defense system, and to develop a simulation program that reflects it. The results of the defense activities of other ships in the fleet can be reflected by receiving information about the status of the enemy missiles. The allocation of defensive assets is based on the survival probability of the ship, not on the destruction of enemy attacks, which can be obtained as the product of the expected survival probability for each enemy missile. In addition, the concept of predicted survivability was introduced to assess the loss of future defense opportunities that would result from assigning a new command. A simulation program was also developed as a tool for realizing the proposed concept of operations, which generated cases.

**Keywords :** Naval surface to air Missile, Defense System, Weaponing, Missile Defense

### 1. 서론

현대 해상전은 함포 보다는 장거리 유도 미사일 위주로 이루어진다[7]. 2차 대전 이후 로켓 기술과 통신 기술의 발달로 대함 유도탄은 20세기 후반 해상 교전에서 많은 성과를 거두었다[12]. 이렇듯 함정 생존에 대한 최우선 위협에 대항하기 위해 개발되고 있는 것이 함대공 요격 체계이다[7, 12, 13, 14]. 해당 체계는 기본적으로 지상에서 운용되는 지대공 유도미사일 체계와 유사한 형태이지만 탑재된 함정 단독으로 운영된다는 특징이 있다.

방어자산으로 분류되는 무기체계는 공격을 위한 체계와는 구별되는 특성이 있다. 공격 자산의 경우, 살상효과(Probability Kill, Pk)로 표현되는 효과도(Effectiveness) 지표에 따라 분석하지만, 방어체계의 경우 적을 억제하거나 아군의 생존률을 높이는 것을 효과도의 정의로 채택하게 된다[9, 10, 15].

기존 함대공 방어체계에 대한 연구들은 다양한 주제를 포함하고 있다. 효과도의 주요한 성능요소(MOP, Measure of Performance)에 대한 연구들은 탐지 및 해석 능력[5]이나 전체 대응시간[2, 3] 등을 다루기도 하였다.

그러나 해당 방어체계가 무기체계라는 점에서 가장 주요한 연구 주제는 효과도 개선과 운용 개념에 관한 것이다. 운용 개념은 무기 및 소프트웨어 등의 체계를 활용

Received 6 November 2023; Finally Revised 14 November 2023;  
Accepted 14 November 2023

<sup>†</sup> Corresponding Author : taegu.kim@hanbat.ac.kr

하기 위한 주요 원칙을 의미한다. 특히 무기 체계의 경우 구체적인 절차나 판단 기준을 포함하고 있으며, 운용 방식으로도 표현한다. 이러한 연구들에 있어서 주된 문제는 다수의 적탄을 효과적으로 방어하기 위한 운용 방식, 즉 무기 할당에 관한 것이다. 함정의 경우 여러 무기체계가 탑재된 복합 체계의 형태를 띄고 있으므로, 적에게 알맞은 무기체계를 할당하는 것이 중요하다. 연구된 할당 방식들은 적과 자신에 대한 확률적 평가를 기반으로 한 규칙기반 형태[7], Park and Lee[14]로부터 함의 취약부 방어를 우선으로 하는 경우[6] 등 다양하다. 규칙기반 형태[7]의 경우 적 위협과 방어 대상인 아군함의 상황에 따른 탐지 및 격추 확률에 대한 평가를 바탕으로 우선 순위를 결정하고 있으며, 기존의 거리기반 평가를 개선하였다. 또 다른 연구[14]는 전체 적 시간에 대한 요격 확률의 일정 형태를 가정하고 최적 요격 지점 및 시간을 도출하는 최적화 수리모형의 개발에 초점을 맞추고 있다. 이 연구들은 본 연구와 가장 가까운 성격을 가지고 있으나 단일 함정의 단일 무기체계이며, 동적 할당을 다루고 있지 않다.

앞서 언급한 바와 같이 운용 개념 연구들은 큰 틀에서 무기 할당(Weaponering) 문제에 해당한다. 특히 최근에는 동적 할당(Dynamic Weaponering)을 위한 연구들[1], Ha[4]이 시도되고 있다. 그러나, 기존 연구들은 단일 함정 및 체계에 관한 연구라는 점에서 방어자산의 복합 운용은 거의 다루지 않고 있다. 유사한 무기체계인 지대공 방어체계의 경우, 다수의 발사대를 운용하기 위한 연구가 수행된 바 있다[8, 9, 11, 15].

본 연구에서는 함대공 방어체계의 운용개념을 복합 및 동적 운용의 형태로 가능하도록 하는 개념을 제안하고자 한다. 함대 운용을 위해 네트워크로 전달된 외부 정보를 활용하는 방안을 포함한 무기 할당 논리를 개발하고, 이를 시뮬레이션 프로그램을 통해 구현하고자 하였다. 또한, 기존 연구에서 다루어진 바 없는 예측 생존율 개념을 통해 제한된 방어 자산의 할당이 갖는 위험부담을 의사결정에 반영하기 위한 논리를 제안하였다는 점 역시 새로운 시도이다.

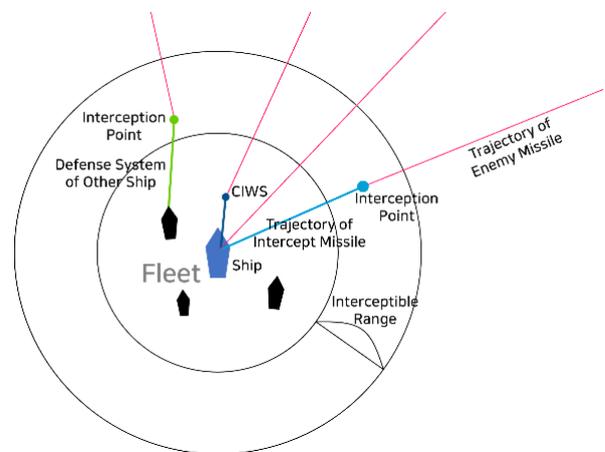
이후의 구성은 다음과 같다. 제2장에서 운용개념을 제안하고, 제3장에서는 이를 구현하는 시뮬레이션 프로그램의 개발 및 활용 사례를 제시한다.

## 2. 운용개념 연구

### 2.1 분석 대상

본 연구의 분석 대상은 함대 내에 포함된 함대공 요격

체계를 탑재한 함정이다. <Figure 1>이 묘사하는 바와 같이, 적 공격은 원거리에서 발생하여 직선 형태로 항속하여 접근하게 된다. 함정에서는 요격 미사일을 발사하여 적을 요격하게 된다. 요격은 미사일의 성능과 안전을 고려하여 일정 거리 범위에서 이루어지도록 설정되어 있다. 한편, 함대의 다른 함정에도 방어 체계가 존재하므로 적 공격에 대해 다른 함정의 요격 체계가 대응하여 요격이 이루어지는 경우도 발생하게 된다. 또한 모든 함정에는 근접한 적 미사일에 대해 응사할 수 있는 근접방어무기체계(CIWS, Close-in weapon system)가 존재한다.



<Figure 1> Operation Environment for Research

### 2.2 함대공 방어체계 운용개념

분석 대상 함정은 함대에 포함이 되어 있으므로 적의 위협에 대해 대응을 하기 위해서는 함대에 포함된 다른 함정의 대응 방식이 고려되어야 한다. 그러나 본 연구는 함대공 요격 체계를 탑재한 단일 함정의 운용 방식에 초점을 맞추고 있다. 따라서 함대 내 다른 함정의 방어자산이 운용되는 방식은 아군 타 함정의 방어자산 활용 결과에 따라 적 공격이 소멸되는 방식으로 반영된다. 즉 다시 말해 함대 전체의 탐지 및 요격체계 명령에 관한 정보가 완벽히 공유되지 않은 상황이다. 적 미사일이 함대 내 타 함정의 요격체계에 의해 파괴된 결과는 탐지 혹은 탐지 정보의 공유를 통해 확인할 수 있다고 보는 것이다. 본 연구에서는 이와 같이 제공된 정보에 의한 함대 내 함대공 요격체계 운용개념을 연구하고자 한다.

요격체계의 명령 수행과정은 다음과 같다. 탐지자산적 미사일의 존재와 궤적을 식별하고 함교의 명령체계에 전달한다. 명령체계에 해당하는 통제시스템은 요격 미사일의 기존 명령 스케줄과 적 미사일의 위협 정도 및 궤적을 고려하여 새로운 요격 명령을 할당한다. 할당된 명

령은 요격체계로 전달되어 예정된 시간에 발사를 수행한다. 앞서 설명된 바와 같이, 적 공격이 함대 내 다른 방어자산의 운용 등에 따라 소멸되거나, 함정이 발사한 요격 미사일에 의해 파괴될 경우, 해당 정보는 탐지 정보의 습득과 동일하게 처리된다.

추가적으로, 함정 내 다른 방어자산으로 CIWS가 포함된다. CIWS는 적이 일정 거리내에 접근하는 경우 작동된다. 함정의 좌우현에 2기씩이 존재한다고 가정하므로 동시에 대응할 수 있는 적의 공격은 같은 방향일 경우 최대 2개, 전체적으로는 4개이다.

위의 명령 수행과정에서 핵심이 되는 부분은 요격 명령 할당이다. 적 위협에 대한 새로운 정보가 전달되면, 함교의 통제시스템은 새로운 요격 미사일의 발사 여부를 결정한다. 요격 미사일의 발사는 요격 발사체계의 작업 스케줄링 정보를 업데이트 하는 방식으로 이루어진다. 따라서, 식별된 각 적에 대한 요격 가능 시점과 현재까지 예정된 요격 미사일 발사 명령의 조합을 고려하게 된다.

요격 의사결정은 4단계를 거치게 된다. 첫째, 식별된 적 미사일의 궤적을 계산하여 요격 가능영역 내 진입 및 탈출 시점을 계산한다. 둘째, 각 지점에서 적을 명중시킬 수 있는 요격 미사일의 발사시간을 역산한다. 셋째, 기존 명령 스케줄을 고려하여 해당 적 미사일에 대응하기 위해 가능한 미사일 발사시간을 확인한다. 넷째, 판단 기준에 따라 여러 적 미사일 중 최적의 명령을 선택하여 미사일 스케줄을 생성한다.

명령을 생성하기 위한 적의 궤적 상 위치와 명령 스케줄의 반영 과정을 <Figure 2>에 표현하였다. 첫 번째 시간 축 상의 점은 현재 요격을 고려하고 있는 적의 예상

요격 시점이다. 해당 시점에 요격하기 위해서는 요격 미사일의 항속 시간(Flying time)을 고려하여 그 이전에 발사되어야 한다. 이 두 관계를 고려하면, 적이 요격가능거리(Interceptible Distance)에 있는 시간 범위에 대해 대응되는 요격 미사일의 발사 시간 범위(Launch time range)를 구할 수 있다. 마찬가지로, 요격 명령이 실제 발사로 이어지는 과정에서의 지연 시간(Command delay)을 반영하면, 해당 적을 요격하기 위해 명령이 가능한 시간 범위(Command time range)를 구할 수 있다.

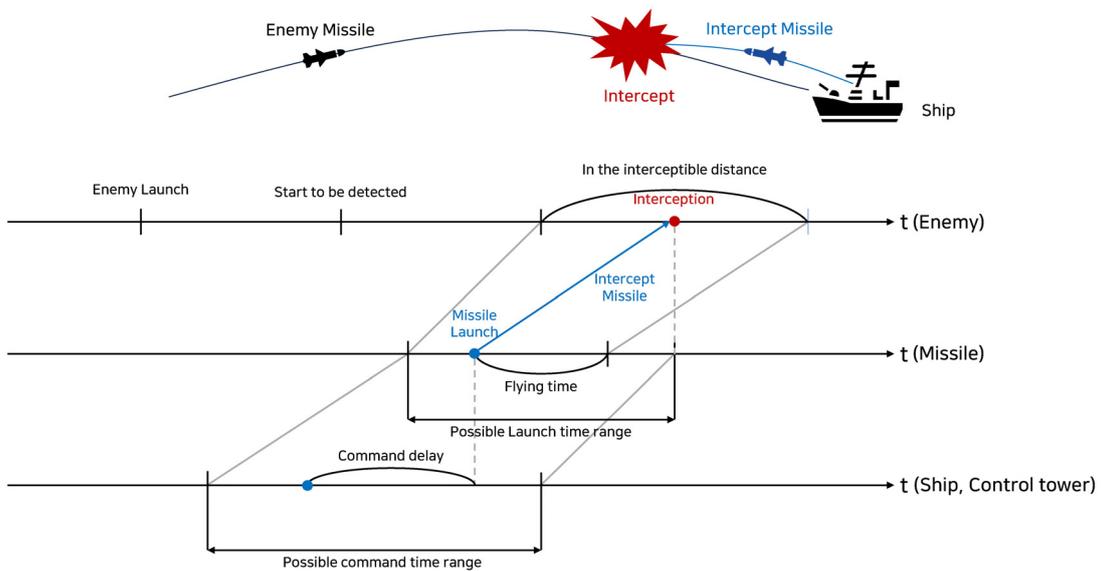
### 2.3 함정 생존율

앞서 언급된 의사결정은 식별된 적 위협에 대해 함정의 방어자산을 할당하는 과정이다. 이때 한정된 방어자산, 즉 요격 미사일 발사 가능 시간의 일부를 어느 적에 대응시킬지 결정하기 위해서는 의사결정 기준이 필요하다.

함정 방어체계의 운용 목적은 함정의 생존율을 최대한으로 하는 것이다. 이를 위해서 우선 함정의 생존율 논리를 정의하고, 이를 통해 다양한 요소를 고려하는 의사결정 기준을 제안하고자 한다.

일반적으로 적  $i$ 의 공격이 갖는 아 장비의 살상확률이  $P_{kei}$ 라고 할 때, 아 장비의 생존율은  $S_i = 1 - P_{kei}$ 가 된다. 적 미사일이 아군 함을 파괴하는 과정에서 일어날 수 있는 사건을 미사일의 도달 여부, 명중 여부, 살상 여부로 나누어 살펴보고자 하면 위 식은 다음과 같이 변경할 수 있다.

$$S_i = 1 - P_{k/h,ci} P_{h/d,ci} P_{dei} \tag{1}$$



<Figure 2> Decision Process over Time Horizon

이때  $P_{d,ei}$ 는 적 미사일의 아군 함 도달 확률,  $P_{h/d,ei}$ 는 피격 거리 도달 후 자체 유도를 통한 함정 명중 확률,  $P_{k/h,ei}$ 는 함정 피격 시 파괴 확률이다.

함정의 방어체계는 다음과 같이 반영된다. 만약 함정이 방어자산을 활용하여 적을 요격하고자 하는 경우, 우선 요격 미사일의 적 살상확률  $P_{kmj}$ 은 적의 도달 확률을  $P_{d,ei}$ 에서  $P_{d,ei}(1-P_{kmj})$ 으로 감소시키게 된다. 함정 내 요격 미사일과 CIWS가 복합적으로 작용하는 경우  $P_{d,ei} = P_{d,ei}(1-P_{kCIWS})(1-P_{kmj})$ 로 변화하게 된다. 이를 일반화하면 방어자산 와  $j$ 그 요격확률  $P_{kj}$ 를 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{d,ei} = P_{d,ei}(1-P_{kCIWS}) \prod_{j \in M_i} (1-P_{kmj}) \quad (2)$$

이때  $M_i$ 는 적  $i$ 에 대응하도록 명령된 요격미사일의 집합이다.

적 위협이 둘 이상인 경우, 함정의 종합적인 생존율은 각 생존율  $S_i$ 의 곱으로 구할 수 있다.

$$S = \prod_i S_i = \prod_i (1 - P_{k/h,ei} P_{h/d,ei} P_{d,ei}) \quad (3)$$

$$= \prod_i (1 - P_{k/h,ei} P_{h/d,ei} P_{d,ei} (1 - P_{kCIWS}) \prod_{j \in M_i} (1 - P_{kmj}))$$

본 연구에서는 현재 식별된 적 이외의 위협이 존재할 가능성을 고려한 예측 생존율 개념을 제안한다. 이는 새로운 요격 명령을 할당하기 위한 판단 기준은 물론, 방어자산을 가지고 있는 다른 함정과 의 복합 운용 개념에 기여할 수 있다.

현재 생존율이  $S$ 인 함정의 일정 시간 후 예측 생존율을  $\bar{S}$ 이라고 하자.  $\bar{S}$ 와  $S$ 의 차이는 미래 일정 시간 동안 추가 발생하는 적 위협의 크기로 설명할 수 있다. 즉,  $\bar{S} = S \cdot E(S_f)$ 이며  $E(S_f)$ 는 예상되는 적 공격으로부터 함정이 생존할 확률이다.  $E(S_f)$ 는 앞서 정의된 개별 적 공격에 의한 생존율  $S_i$ 과 적 공격의 기대값  $e_n$ 을 이용하

면  $E(S_f) = S_i^{e_n}$ 으로 표현할 수 있으므로 최종적으로 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\bar{S} = S \cdot S_i^{e_n} \quad (4)$$

### 2.4 생존율과 명령할당

함정 요격체계 운용의 목적은 생존율을 높이는 것이다. 따라서 의사결정 과정은 주어진 상황에서 선택가능한 대안들을 평가하여 가장 생존율이 높은 경우를 선택하는 것이라고 할 수 있다.

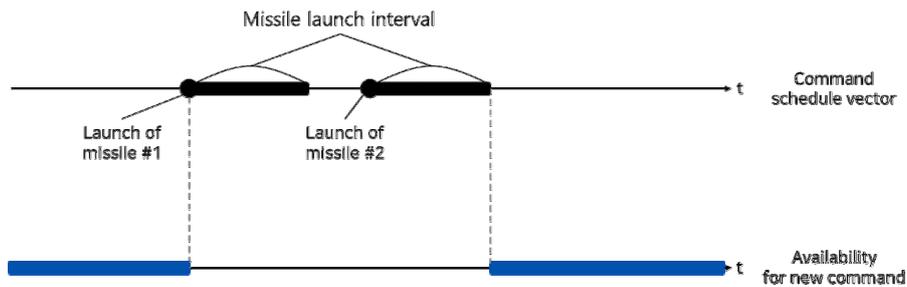
$$\max_{j \in J_i} \bar{S} \quad (5)$$

이때  $J_i$ 는 현 시점에서 명령 가능한 요격 미사일 대안의 집합이다. 각 미사일 명령  $j$ 는 대상 적 미사일과 발사 시점이 결합된 정보  $j = (j, ei, tj)$ 으로 정의할 수 있다.

새로운 명령 할당은 생존율에 두 가지 측면의 변화를 가져온다. 첫 번째는 미사일의 요격을 통한 적 위협의 소멸을 통한 생존율 증가이다. 식 (3)에서  $\prod_{j \in M_i} (1 - P_{kmj})$ 에 새로운  $(1 - P_{kmj})$ 가 추가되면서 생존율  $S$ 가  $S'$ 로 증가하는 것이다.

다른 한 편으로, 명령 할당은 방어자산의 소모로 인한 취약성을 야기할 수 있다. 이는 다시 단기적인 손실과 장기적인 손실로 나누어 살펴볼 수 있다. 단기적인 손실은 대응 불능 시간의 발생 때문이다. 미사일 발사장치는 발사 명령을 수행하기 위한 지연시간으로 인해 발사 명령 간 시간 간격이 존재한다. 따라서, 특정 시점을 지정한 명령이 할당되면, 미사일을 발사한 후 일정 시간 동안은 방어자산이 무력화된다. 이를 그림으로 표현한 것이 <Figure 3>이다. 그림에서는 2개의 발사 스케줄이 존재함에 따라 그 사이에 공백이 있지만 다른 요격 명령을 넣을 수 없게 되었다.

앞서 <Figure 2>에서 묘사한 바와 같이 적 미사일은



<Figure 3> Command Schedule Vector

그 궤적에 따라 요격이 가능한 시점이 한정적이다. 따라서 위와 같이 일정 시간 동안 새로운 요격 명령을 할당할 수 없는 경우 그 피해를 전체 요격 가능 시간 대비 요격 기회를 손실한 시간 간격의 비율로 표현할 수 있다. 이제 해당 발사 명령에 따라 요격 기회를 손실할 수 있는 모든 적 미사일의 발생 상황을 고려하여 그 발생 시점 별로 적분하면 다음 <Figure 4>와 같은 형태가 된다.

평행사변형으로 묘사된 영역은 새로운 명령이 없을 때의 요격 기회의 총 합이다. 한편, 요격 기회 손실은 직사각형 영역과 겹쳐진 부분으로 표현된다. 평행사변형에 대해 겹쳐진 영역의 비율은 평행사변형의 아랫변 길이를  $l$ , 요격 기회 손실의 시간 폭을  $x$ 라 할 때,  $l/(x+l)$ 로 표현 가능하다. 즉 1에서  $\rho = x/(x+l)$ 로 줄어드는 것으로 볼 수 있다. 이때  $l$ 은 적 미사일에 대한 요격가능 시간 범위의 평균값으로 구할 수 있다.

따라서, 새로운 발사 명령 추가 시 단기적 손실로 인한 예측 생존율의 변화는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$(\bar{S}'') = S' \cdot S_i''^{e_n} \tag{5}$$

단  $S_i'' = S_i \rho = S_i \cdot x/(x+l)$ 이다.

장기적 손실은 제한된 방어자산의 소모로 인한 간접적인 기회 손실이다. 함정에 탑재된 요격 미사일의 수에는 한계가 있으므로, 요격 명령을 남발할 경우 미래의 적 위협에 대해 대응할 수 없게 된다. 남은 요격 미사일의 수를  $M$ 이라고 할 때, 이후 일정 시간 동안 발생할 적 위협의 수가  $M$  이하인 경우의 예측 생존율은 지금까지 구한 식과 동일하다. 그러나, 적 위협의 수가  $M$ 보다 크게 되는 경우 예측 생존율이 큰 폭으로 감소한다. 그러나,

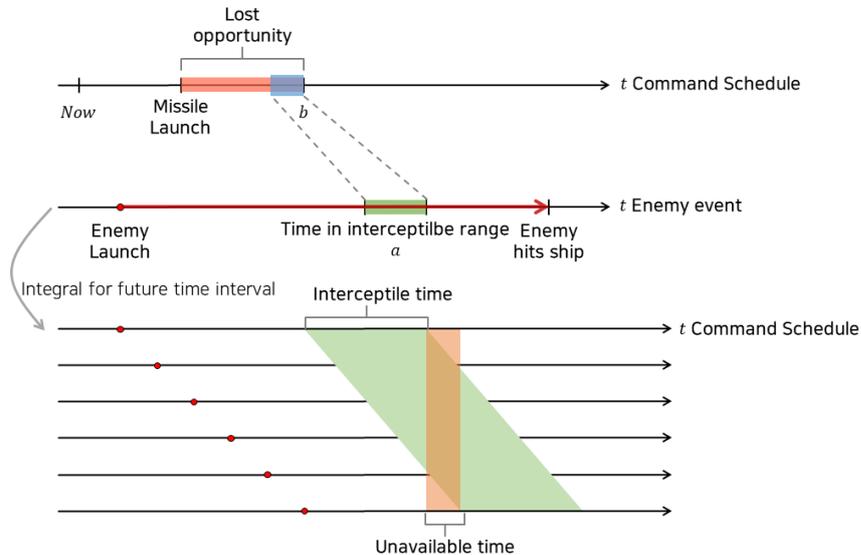
함대 운용을 고려하는 경우 복잡성에 비해 영향이 상대적으로 작다고 보아 본 연구에서는 포함하지 않는다.

이와 같이 새로운 명령 할당은 현 시점에서 어느 적을 어떤 시점에 요격할 것인지를 예측 생존율을 바탕으로 평가하여 선택하는 과정이다. 그러나, 만약 단기적 손실에 의한 생존율 감소가 작거나 거의 없다면 해당 논리는 식별된 적 공격에 대해 지속적으로 요격 명령을 중복 할당하게 된다. 이를 보완하기 위해서는 다음과 같은 두 가지 논리를 활용할 수 있다.

첫째, 적 위협 당 대응 방어자산의 수를 한정하는 것이다. 이는 유사한 형태의 방어체계의 운용 개념에서도 등장한 것으로서, 사전에 미사일의 요격 능력을 평가하여 적을 파괴할 확률을 일정 이상으로 보장받고자 하는 방식이다. 특히, 단거리 요격의 경우 먼저 발사된 요격 미사일이 적 파괴에 실패할 경우 다시 명령을 할당할 시간적 여유가 없기 때문에 선호되는 방식이기도 하다.

둘째, 각 적 미사일 별로 요격 성공 확률을 일정 이상이 되도록 하는 방법이 있다. 현재까지 해당 적에 대응된 미사일의 예상 요격 성공률을 평가하여, 기준 이하일 경우에만 추가로 요격 미사일을 할당하는 방식이다[7].

그러나, 앞서 언급한 바와 같이 방어자산 운용의 목적 함수는 적군 요격률이 아닌 아 함정의 생존율이다. 또한 함정 생존율은 식 (3)에서 표현된 바와 같이 개별 적 공격으로 구분된 생존율의 곱이다. 따라서, 개별 적 공격에 대한 기준은 해당 적 공격에 대응하여 함정이 생존할 확률  $S_i$ 에 대해 설정되어야 한다. 즉  $S_i$ 가 일정 값 이하인 적에 대해서만 새로운 방어자산을 할당하는 것이다.  $S_i$ 는 적 요격확률과 달리 다른 방어자산에 대한 고려가 가능하며, 시간에 따라 재평가를 통해 변화된 정보를 반영할 수 있다.



<Figure 4> Visualization of Lost Opportunity for Future

### 3. 시뮬레이션 프로그램 개발

이 절에서는 제안된 운용 개념을 구현하는 시뮬레이션 프로그램의 구조와 개발 결과를 서술한다. 시뮬레이션 프로그램은 Matlab 2022을 통해 작성되었다.

#### 3.1 가정 및 기본 정보

운용 개념의 확인을 위해 가정된 작전 환경은 다음 <Table 1>과 같다. 개념 연구를 위해 보안 상 민감자료는 모두 임의의 수치를 사용하였다.

아 함정의 위치를 원점으로 하는 좌표계를 설정하고  $x$ 축은 동쪽,  $y$ 축은 북쪽으로 가정한다. 적의 공격은 수백 km 바깥의 공해상에서 이루어진다고 가정하며, 수면 일정 높이를 유지하며 항속한다고 보았다. 적 미사일의 탐지 및 대응은 항속 단계 이후에 이루어질 것이므로 적 미사일의 초기에 발생하는 가속 궤적은 묘사에서 제외하였다. 적 공격 원점은 동해상의 북쪽의 일정 범위를 상정하였으며, 발생 간격은 지수 분포의 대기행렬을 사용하였다. 또한, 적의 함정 파괴확률  $P_{k/h,ei}$ 은 항속거리와 속도에 따라 변화하는 값으로 정의하였다.

<Table 1> Simulation Environment for Enemy

Item	Value	Notes
Ship Location	(0,0)m	
Enemy origin (distance)	300km ~ 500km	uniform distribution
Enemy origin (azimuth)	30° ~ 120°	uniform distribution, east = 0°
Enemy interval (second)	8s	exponential distribution
Enemy velocity (speed)	N(1500, 502) km/h	normal distribution
Enemy Pk/h	60%	function of speed and cruising distance

함정의 탐지 및 방어자산에 대한 설정은 다음 <Table 2>에 정리하였다. 환경 및 적의 경우와 마찬가지로 수치들은 임의의 값으로 대체되었다. 적 공격과 마찬가지로 요격 미사일 역시 해면 위 순항 궤적을 유지한다고 보았다. 다만, 초기 가속 구간이 존재한다고 가정하여 속도와 궤적을 생성하였다. 탐지 자산의 경우 2초마다 정보가 갱신되며, 적 미사일의 탐지 확률은 매 80%로 설정하였다. 실제로는 거리에 반비례하는 RCS(레이더 반사면적, radar cross section)의 함수이지만, 편의성을 위해 단순화하였다. 또한, 2번 이상 탐지된 개체에 대해서만 식별이 가능하다고 가정하였다.

<Table 2> Simulation Environment for Ship

Item	Value	Notes
Radar detection range (distance)	up to 300km	
Radar detection interval	2s	1 round detection
Radar detection probability	80%	per round (2s)
Missile intercept range	50 ~ 150 km	
Missile cruising velocity	500 km/h	maximum speed
Missile acceleration range	5s	launch to cruising stage
Missile launch interval	4s	
Missile Pk	90%	function of distance
Missile Capacity	40	
CIWS range	5 km	
CIWS Pk	0.5% / s	
Command delay	7s	Time between command and actual launch

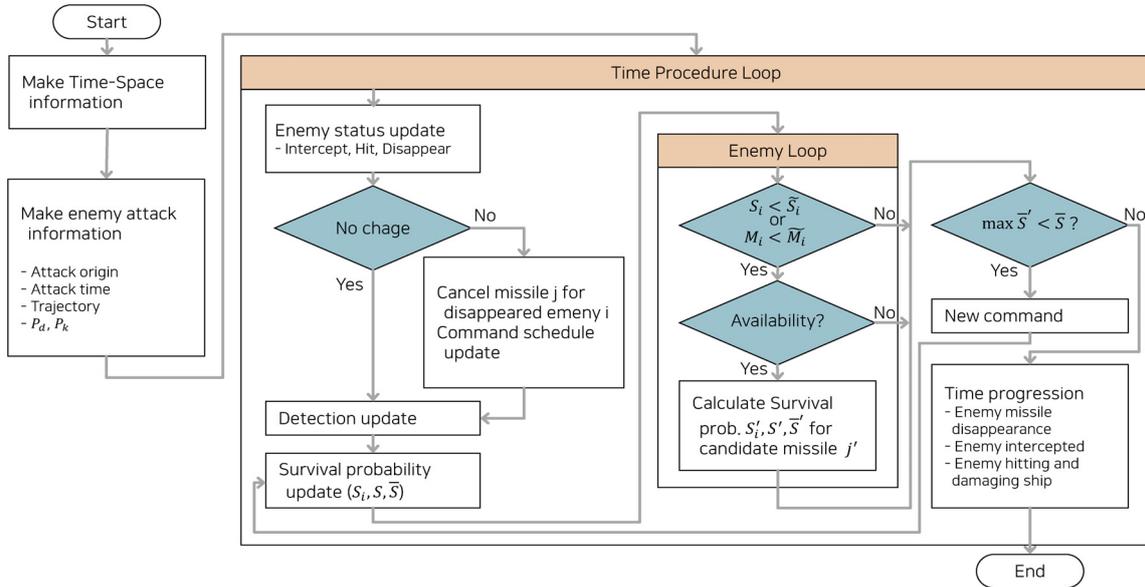
#### 3.2 프로그램 실행 절차

프로그램의 전체적인 수행 알고리즘을 <Figure 5>로 표현하였다. 프로그램이 시작되면 시공간 정보를 생성한 후, 적 위협 정보를 우선적으로 생성한다. 앞 절에 설정된 값을 바탕으로 적의 공격 원점, 공격 시간, 궤적, 함정 파괴 확률 등을 도출한다.

이후 시간이 진행되며 정보 업데이트, 명령 할당, 시간 진행 및 평가를 반복하게 된다. 각 시간 단위 활동의 첫 단계는 정보의 업데이트이다. 이전 시간 단위의 활동 이후로 변화된 적 정보를 확인하여 반영한다. 만약 적 미사일이 요격되거나 함대 내 다른 함정에 의해서 파괴될 경우 이를 명령 스케줄에 반영한다. 본 연구에서는 함대 내 다른 아군 함 및 방어자산을 묘사하지 않으므로 확률적으로 적 미사일이 소실되는 방식으로 처리한다. 사라진 적  $i$ 에 할당된 요격 미사일 명령  $j$ 가 존재하는 경우 해당 명령 정보를 삭제하고 명령 스케줄에서 해당 시점을 명령 가능 상태로 되돌린다.

정보 업데이트의 마지막 단계는 해당 시점에서 레이더의 적 탐지 여부 확인이다. 탐지 시간간격과 확률을 적용하여 탐지 여부를 판단하고, 이를 누적 계산하여 복수 탐지된 적 미사일 집합에 대해 명령 할당할 수 있도록 한다.

명령이 가능한 적 미사일에 대해 현재까지 할당된 요격 미사일 명령을 토대로 생존 확률 ( $S_i, S, \underline{S}$ )을 계산한



<Figure 5> Program Flow Chart

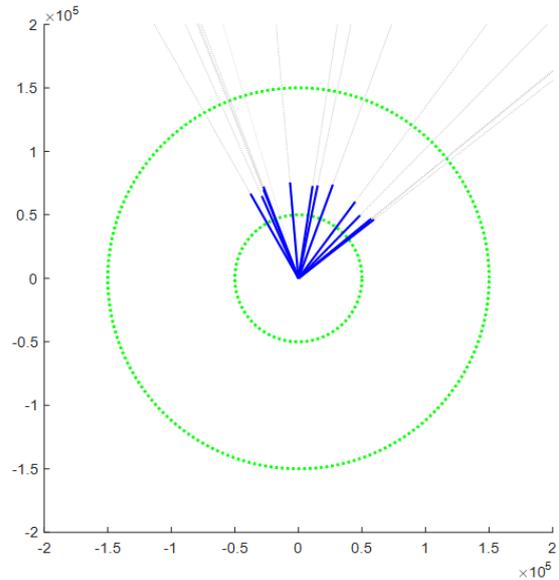
다. 이 값들을 기준으로 새로운 명령 할당 여부를 결정하는 적 미사일 별 반복문을 수행한다. 각 적 미사일에 대해  $S_i$  혹은 할당 요격 미사일 제한을 만족하고, 현재 명령 스케줄의 공백 중 적을 요격하기 위해 적합한 시간이 존재하는 경우 명령 후보  $j_i$ 를 생성한다. 잠정적인 이 명령의 결과로 예상되는 생존 확률을 계산한 후, 모든 적 위협에 대해 탐색된 명령 후보 중 가장 높은 예상 생존 확률을 도출한 명령 후보를 선택한다.

명령 후보  $j_i$ 가 기존에 계산된 생존 확률보다 높은 생존 확률을 보장할 경우, 새로운 명령을 할당하고 다시 새로운 명령을 생성하기 위한 적 미사일 별 반복 과정을 수행한다. 이 과정은 더 이상 새로운 명령을 통해 생존율을 개선시킬 수 없을 때 완료된다.

시간 별 활동의 마지막 단계는 시간 간격 동안 발생하는 일들에 대한 처리이다. 다음 시간 간격까지 적 미사일의 소실, 미사일에 의한 요격, CIWS에 의한 요격, 적 미사일의 함정 타격 중 어느 것이 발생할 지를 확인하여 난수 발생을 통해 확률과 비교하여 결과를 기록한다. 단, 미사일 요격과 적의 소실은 발생 시간을 비교하여 빠른 것부터 처리하고, CIWS까지 요격에 실패한 경우에만 적 미사일은 함정을 타격하게 된다.

### 3.3 프로그램 수행 결과

위에서 설명한 절차에 따라 Matlab으로 작성된 프로그램이 운용 개념을 반영한 결과를 사례를 통해 살펴보고자 한다.



<Figure 6> Simulation Result - Missile Trajectories

위 그림 <Figure 6>는 작전 영역의 평면 상에 적과 요격 미사일의 궤적을 표현한 것이다. 회색 점선은 적 미사일의 궤적, 파란 실선은 요격 미사일의 궤적이다. 두 개의 초록색 원은 요격 가능영역의 범위를 표현한 것이다. 총 15개의 적 위협이 북쪽 방위로부터 발생하였으며, 그 중 2개의 적은 다른 함정의 방어자산에 의해 파괴된 것으로 가정하여 소실 처리되었다. 적 위협은 식별 시점에 따라 각각 요격 미사일을 할당 받았으며, 총 13개의 미사일이 적을 향해 발사되었다. 13개의 미사일 중 1건은

발사 명령 후 적이 소실되었으나, 이미 발사된 후였기 때문에 명령을 회수할 수 없었다. 9개의 미사일이 적 요격에 성공하였으며, 3건의 적 공격은 CIWS 요격에도 실패하여 함정을 타격하였다. 확률적으로 이 3건의 공격에 대해 함정이 생존할 확률은 12% 정도로 평가되었다.

각 적에 대한 시뮬레이션 상세 결과를 다음 <Table 3>에 정리하였다.

<Table 3> Simulation Result

E#	Launch time	Detect. time	Enemy Result	M#	Missile cmd time	Missile launch time
1	0.00	103.87	Dis.	-		
2	6.36	367.45	Killed	9	377.86	386.89
3	15.71	357.39	Killed	8	375.86	382.88
4	16.06	0.00	Dis.	-		
5	28.29	179.07	Killed	4	213.86	222.89
6	45.84	356.60	Killed	10	405.86	412.88
7	49.57	159.35	Killed	3	211.86	218.88
8	62.93	385.20	Killed	11	455.86	462.88
9	66.35	211.84	Killed	5	281.86	288.88
10	70.35	433.80	Hit	12	507.86	514.88
11	75.84	202.30	Killed	7	287.86	296.9
12	79.17	11.86	Hit	1	97.86	104.88
13	82.71	81.72	Killed	2	169.86	176.88
14	88.00	194.60	Dis.	6	285.86	292.89
15	95.64	443.86	Hit	13	541.86	548.88

적 미사일의 발사 순서가 아니라 탐지된 순서에 따라 요격 미사일이 할당되었다는 것을 확인할 수 있다. 또한 3개의 적 미사일 (1, 4, 14번)은 함대 내 다른 방어자산에 의해 요격되었으며, 14번에 할당된 요격 미사일 6번은 그 결과 성과를 거두지 못했다.

한 편, 나머지 적에 대해서는 미사일들이 할당되었다. 명령 시점은 예상 요격시간에 따라 계산된 발사 시점 (Launch time)보다 상당히 앞서 있으며, 최소한 지연 시간 이상의 간격을 두고 이루어졌음을 확인할 수 있다. 요격 미사일 1, 12, 13은 대응된 적 미사일 12, 10, 15를 요격하는데 실패하였다.

## 4. 결 론

무기체계의 복잡성 증가와 네트워크 기반의 전장 운용 개념의 발달은 함대 운용 방식, 특히 방어자산의 운용 개념에 대한 연구 필요성을 제기하고 있다. 본 연구는 함대공 방어체계인 요격 미사일 시스템을 탑재한 함정에

대한 운용 개념을 제안하고 이를 반영한 시뮬레이션 프로그램을 개발하는 것을 목적으로 하였다.

연구 및 제안된 운용 개념을 요약하면 다음과 같다. 다른 함정의 방어활동 결과는 적 공격의 상태 정보를 전달받는 방식으로 반영하였다. 방어자산의 할당은 적 공격의 파괴가 아닌 함정의 생존율을 기준으로 하며, 이는 각 적 공격에 대한 기대 생존율의 곱으로 구할 수 있다. 또한 새로운 명령을 할당할 경우 발생하는 미래 방어계획의 손실에 대해 평가하기 위해 예측 생존율 개념을 도입하였다.

시뮬레이션 프로그램은 제안된 운용 개념을 실현하기 위한 도구로 개발되었으며, 이를 통해 사례를 생성하였다. 제안된 운용개념을 통해 적 공격을 탐지한 후 생존율을 높이기 위해 요격 미사일을 할당한 것을 확인할 수 있었다. 또한, 적 미사일이 소실된 경우 재할당을 위해 이를 확인하여 정보를 관리하고 있다는 것 역시 확인할 수 있었다.

본 연구는 복합 무기 체계의 운용 개념을 함정 방어체계에 적용하였다는 점에서 의의를 갖는다. 특히 개별 함의 운용 방식을 향후 함대 운용에 적용할 수 있도록 외부 정보 변화를 수용할 수 있는 절차를 마련하였다는 점에서 차별성을 갖는다. 세부적으로는, 적 공격에 대한 대응 기준을 요격물이 아닌 생존율로 하여 다른 방어자산의 효과를 함께 고려할 수 있게 하였으며, 명령 스케줄을 시간 벡터로 동적으로 관리하여 명령 할당 후 명령 간격에 따른 불가용 시간 판단과 새로운 정보에 따른 스케줄 업데이트를 도입하였다는 특징이 있다.

이번 연구는 함대 운용 및 복합 방어자산 운용 개념에 대해 다루고 있지만, 하나의 함정을 기준으로 하고 있다는 점에서 한계를 갖는다. 앞으로 복합 방어자산 운용의 기본 방향 및 원칙에 대한 논의를 바탕으로 이를 정량적인 논리와 시뮬레이션 프로그램을 통해 구현하는 것은 매우 가치 있는 연구기회가 될 것이다. 이를 위해, 본 연구의 결과를 활용하고 이를 확장 및 발전시키는 작업이 필요할 것이다.

## Acknowledgments

The study was funded by LIG Nex1.

## References

- [1] An, Y.Y., MMR Based Weapon-Target Assignment Algorithm for Ship Defense, [Master Thesis], [Incheon, Korea], Inha Univeristy, 2019.
- [2] Choi, S.H. and Cho, T.H., Effective Response Time

- Verify of Active Decoy Against Anti-Ship Missile Using DEVS Simulation, *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, 2015, Vol. 25, No. 5, pp. 495-501
- [3] Choi, S.H., Effective response time compare verify of an active decoy against anti-ship missile [Master Thesis], [Seoul, Korea], Sungkyunkwan University, 2016.
- [4] Ha, M.R., Performance Evaluation of Maritime Airborne Threat Estimation and Weapon Allocation Algorithm, [Master Thesis], [Busan, Korea], Pusan National University, 2019.
- [5] Ham, D., Cho, H.C., Ra, W.S., An, J.H., Kim, S.H., and Park, J.H., Long-term Trajectory Prediction of Highly Maneuvering Target for Advanced Naval Close-In-Weapon Systems, *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, 2021, Vol. 70, No. 2, pp. 408-417.
- [6] Jang, W.R., Park, K.K., and Ryoo, C.K., Medium/Short Hard-kill Anti-Air Defense Strategy for Warship Against Multiple Anti-Ship Missiles, *Proceeding on Conference of Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, 2016, pp. 932-933.
- [7] Kim, D., Yun, J., and Ryoo, C.K., Defense Strategy against Multiple Anti-Ship Missiles using Anti-Air Missiles, *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, 2011, Vol. 39, No. 4, pp. 354-361.
- [8] Kim, T., Bae, S.M., and Kim, Y.R., Analysis of Effectiveness of Long Range Artillery Intercept System Based on Complex Attack Scenario, *Spring Conference of Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, 2022, pp. 109-116.
- [9] Kim, T., Kim, Y., Kim, D., Park, I., and Shim, D., Analysis of the Effectiveness of the Long-range Artillery Intercept System According to the Command Assignment Algorithm of the Control Center, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, 2022, Vol. 48, No. 2, pp. 185-197.
- [10] Kim, T., Suh, S., and Jung, G., Analysis Procedure for Fire Power Suppression on Enemy Artillery Base Using FASCAM, *Journal of KIMST*, 2015, Vol. 18, No. 6, pp. 743-754.
- [11] Kim, T., Yun, N., Kim, Y., Park, I., and Shim, D., Effect Analysis of Long-range Artillery Intercept System According to its Component Arrangement, *Journal of the Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, 2022, Vol. 45, No. 1, pp. 41-52.
- [12] Lee, G., Yoon, S.T., and Cho, Y.J., A Feasibility Study on the Estimation of a Ship's Susceptibility Based on the Effectiveness of its Anti-Air Defense Systems, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 2023, Vol. 60, No. 1, pp. 57-64.
- [13] Lee, Y., A Study on the R&D Trend Analysis of the Naval Surface to Air Missiles & Core Technologies, *Proceedings on Conference of Institute of Control Robotics and Systems*, 2011, Vol. 1, No. 2, pp. 720-729.
- [14] Park, H. and Lee, H., A Study on Optimal Operation against Anti-Air Missiles with Consideration of Anti-Surface Missile Kill Probability, *Journal of the KIMST*, 2019, Vol. 22, No. 6, pp. 815-823.
- [15] Yook, J.K., Hwang, S.J., and Kim, T., Impact of MOPs on Effectiveness for M-to-M Engagement with the Counter Long Range Artillery Intercept System, *Journal of the Korea Society for Simulation*, 2020, Vol. 29, No. 3, pp. 57-72.

#### ORCID

- Taegu Kim | <https://orcid.org/0000-0003-0246-3546>
- Woong Jae Na | <https://orcid.org/0009-0000-9446-5404>
- Seo Yeon Yang | <https://orcid.org/0009-0004-6483-7018>
- Yeo Jin Park | <https://orcid.org/0009-0000-0003-8605>
- Dong Hyouk Shim | <http://orcid.org/0000-0002-1875-9192>
- In Chul Park | <http://orcid.org/0000-0002-8135-8789>
- Na Hae Yun | <http://orcid.org/0000-0002-6357-0380>
- Da Bin Ryu | <http://orcid.org/0009-0004-6605-8077>
- Lae Eun Kim | <http://orcid.org/0009-0006-3693-3613>