

다층 대공방어 체계의 신뢰도 향상을 위한 네트워크 모델 기반의 최적 투자 계획 모델

이진호 · 정석문[†]

An Optimal Investment Planning Model for Improving the Reliability of Layered Air Defense System based on a Network Model

Jinho Lee · Suk-Moon Chung[†]

ABSTRACT

This study considers an optimal investment planning for improving survivability from an air threat in the layered air defense system. To establish an optimization model, we first represent the layered air defense system as a network model, and then, present two optimization models minimizing the failure probability of counteracting an air threat subject to budget limitation, in which one deals with whether to invest and the other enables continuous investment on the subset of nodes. Nonlinear objective functions are linearized using log function, and we suggest dynamic programming algorithm and linear programming for solving the proposed models. After designing a layered air defense system based on a virtual scenario, we solve the two optimization problems and analyze the corresponding optimal solutions. This provides necessity and an approach for an effective investment planning of the layered air defense system.

Key words : Layered air defense, Optimization, Network model, Knapsack problem, Linear program

요약

본 연구는 대공위협에 대한 생존성 향상을 위한 다층 대공방어 체계의 최적 투자 계획 모델을 고려한다. 최적화 모델 수립을 위해 다층 대공방어 체계를 네트워크 모델로 표현하고, 가용 예산이 제한되어 있는 상황 하에서 대응실패 확률을 최소화하기 위해 각 방어무기에 대하여 투자여부를 결정하는 모델과 연속적인 투자가 가능한 모델을 각각 제시한다. 비선형 형태의 목적함수를 로그함수를 통해 선형화하였으며, 제시된 최적 모델의 해법으로서 동적계획법 알고리즘과 선형계획법을 제안한다. 가상의 다층 대공 방어 상황을 설정한 후, 두 가지의 최적화 모델에 대한 최적해를 도출하고 그 결과를 분석하였다. 이는 다층 대공방어 체계의 신뢰도 향상을 위한 효과적인 투자 계획 수립의 필요성 및 접근방법을 제시한다.

주요어 : 다층 대공방어, 최적화, 네트워크 모델, 배낭형 문제, 선형계획법

1. 서론

미사일이나 항공기와 같은 대공위협은 주요 시설 또는 해상에서의 해군 함정 등에 치명적인 결과를 가져다줄 수 있는 공격 무기체계이다. 이에 대비하기 위해 방어무기들로 구성되어 있는 대공방어 체계(air defense system)는 위협이 최종 목표물에 도착하기 전에 소프트킬(soft kill) 또는 하드킬(hard kill) 방식을 통해 제거하거나 무력화하는 방어 체계이다. 여기서 소프트킬은 전자전, 기만 등을

* 이 논문은 2017 춘계공동학술대회 발표논문을 수정·보완하여 작성되었습니다.

Received: 07 June 2017, Revised: 07 September 2017,
Accepted: 11 September 2017

[†] Corresponding Author: Suk-Moon Chung

E-mail: linosmchung@gmail.com

Weapon Systems Engineering Dept., Korea Naval Academy,
Jinhae, Korea

통해 위협이 표적을 향하지 않도록 함으로써 생존성을 유지하는 것이며, 하드킬은 직접적인 요격을 통해 위협을 제거하는 것을 의미한다(Jang et al., 2016). 다층 대공방어 체계(layered air defense system)는 소프트킬 및 하드킬 방식을 대응 가능한 거리 및 조건에 따라 단계적으로 혼용함으로써 대공위협으로부터 생존성을 높이고자 하는 방어 체계라 할 수 있다.

해상에서 해군 함정의 경우, 고가치 함정일수록 대공위협에 피격될 시 엄청난 손실을 초래하므로 다층 대공방어 체계를 구축하고 있으며, Kang(1994)이 제시한 함정의 이상적인 다층 대공방어는 장거리 항공탐재 조기경보 체계, 장거리 항공기 대공방어, 함재 레이더/전자전 정찰, 중거리 함재 대공방어, 단거리/근거리 전자전 방어, 근접 함재 대공방어 등을 제시한다. 적 유도탄의 공격 상황을 가정하여 함정의 특수별 보유 방어체계를 달리하여 생존성 시뮬레이션을 수행한 Choi & Park(2014)을 참고해 볼 때, 통상 함정이 보유한 다층 대공방어 체계의 종류로는 전투체계 및 대공 센서, 기만기, 재머, 장거리/중거리/단거리 요격용 유도탄 및 근접방어무기체계(CIWS: closed-in weapon system) 등으로 구분해 볼 수 있다. Fig. 1은 해상에서 해군 함정의 다층 대공방어 체계가 거리대별 단계적으로 대응하는 예를 보여준다. 따라서 거리대별 가용 무기체계를 표적에 할당함으로써 함정의 생존성을 보장하고자 하며, 원거리 대응 무기체계에 의해 위협을 무력화하는데 성공하게 되면 근거리 대응이 불필요하게 된다. 반면 최단거리 대응에도 실패할 경우 함정의 생존성은 보장될 수 없다.

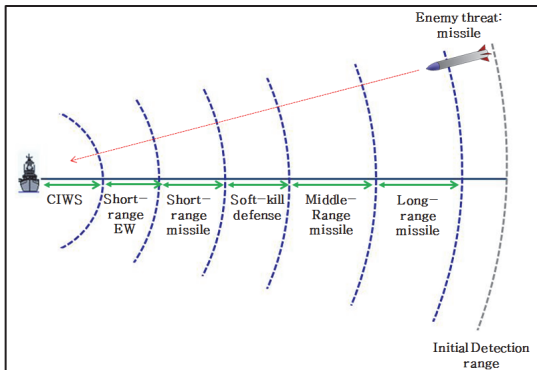


Fig. 1. An example of the layered air defense system for Navy surface warships

대공전 임무를 효과적으로 수행하기 위한 연구들은 비교적 활발히 진행되어 왔다. Hwang(2007)은 차기 고속정

의 대공전 기능을 분석하고 이에 대한 효과적인 개발 방법론 수립을 위한 시뮬레이션 기법을 제시하였으며, Lee & Jeong(2006)은 구축함이 미사일 방어를 가장 효과적으로 할 수 있는 최적 배치를 결정하는 모형을 제시하였다. 또한 대공방어무기체계의 교전 효과도를 향상시키기 위해 함정의 구조물 및 교전금지구역 등을 고려한 함상에서의 효과적인 배치 위치를 분석한 연구(Hwang, 2006), 근접방어무기체계의 효과적인 방어기법(Kim et al., 2010), 마코프 체인을 적용한 근접방어무기체계의 피격률 분석(Kim & Yoon, 2014) 등의 연구가 진행되었다. 그러나 현대의 함정은 다층 대공방어를 통해 대공전을 수행하고 있으며, 이를 고려한 운용개념, 효과도, 성능 개선 등에 관한 연구는 비교적 제한적이었으며, 특히 본 논문에서 제시하고자 하는 최적화 모델을 통한 접근은 이루어지지 않았다.

본 연구에서는 다층 대공방어 체계에 대하여 대공위협이 최초 탐지 가능한 거리 내에 진입했을 경우, 대응가능한 각 방어무기들의 유효사거리 등을 고려하여 단계적으로 대응하는 것으로 설정하며, 각 방어무기들의 신뢰도의 조합을 통한 함정의 신뢰도를 정의하여 각 방어무기들의 신뢰도 향상을 위한 투자 모델을 수립함으로써 함정이 최종적으로 대공위협에 피격되지 않고 생존성을 보장하는 확률을 최대화하는 최적화 모델을 제시하고자 한다. 이 때 단계적으로 대응하는 각각의 방어무기들의 사용 결과는 다음 단계에 영향을 미치지 않는 것으로 가정함으로써 네트워크로 단계적 대응 시스템을 표현할 수 있음을 보여준다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 다층 대공방어 체계의 신뢰도 향상을 위한 네트워크 기반의 최적화 모델 및 최적해 도출을 위한 알고리즘을 제시한다. 3장에서는 제시된 모델의 해법을 이용하여 계산 실험을 수행하고 그 결과를 통해 모델의 유용성을 보여준다. 이를 바탕으로 4장에서 본 연구의 결론과 함께 향후 연구방향에 대해 제안한다.

2. 모델 수립

단계적으로 대응하는 다층 대공방어 체계는 네트워크 모델로 표현이 가능하며, 특정 단계에서 대응이 성공적으로 이루어지지 않으면 다음 단계 대응으로 이동하는 특징을 이용하여 방향성 경로(directed path)를 가지는 네트워크(Ahuja et al., 1993, pp.25-26)로 모델링할 수 있다. 본 장에서는 다층 대공방어 체계의 네트워크화를 통한 최적 투자 계획 설계를 위한 최적화 모델을 제시한다.

2.1 네트워크 모델

모든 단계에서의 대응이 실패할 경우 적 미사일 또는 항공기에 의해 피격됨으로써 재앙적 상황이 발생하게 되는 네트워크로 모델링하며, Fig. 2는 본 연구에서의 방향성 경로를 가지는 네트워크 모델을 보여준다.



Fig. 2. Network representation of the layered air defense system as a directed path

<Sets/Indices>

- Network $G=(N,A)$
- N : 노드(Node)의 집합, $i=1,2,\dots,n$
- A : 아크(Arc)의 집합, $(i,i+1), i=1,2,\dots,n-1$

네트워크 모델에서 노드는 단계적으로 대응하는 방어 무기를 나타낸다. 따라서 각 노드에서 대응이 성공적으로 이루어지면 다음 노드로 전이가 이루어지지 않고 종료되며, 실패할 경우 다음 노드로 전이되어 해당 노드에서 다시 대응하게 되며 마지막 노드까지 대응이 실패할 경우 피격되어 재앙 또는 재난이 발생함을 의미한다.

노드 i 에서의 대응이 성공적으로 이루어질 확률을 p_i 라고 정의하며, 선행단계에서의 대응 결과가 다음 단계에서의 대응 결과에 영향을 미치지 않는 것(즉, 독립)으로 가정한다. 이 때 Fig. 2의 네트워크 모델에서 아크를 통해 다음 단계로 전이될 확률은 $1-p_i$ 이며, 이를 다시 네트워크 모델에 표현하면 Fig. 3과 같다.

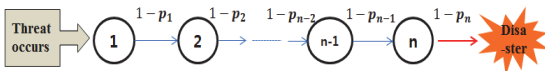


Fig. 3. A reliability path for the layered air defense system on a network model

따라서, 모든 노드에서 성공적인 대응에 실패하여 재앙에 도달할 확률은 식 (1)과 같다.

$$(1-p_1)(1-p_2)\dots(1-p_n) = \prod_{i=1}^n (1-p_i) \quad (1)$$

2.2 이산 최적 투자 모델

식 (1)에서 표현된 다층 대공방어 체계의 대공방어 실패확률을 최소화하기 위해 각 노드의 성공적인 대응확률

인 p_i 를 투자를 통해 더욱 높게 된다면 대공방어 체계 전체 신뢰도는 높아지게 되며, 본 논문은 주어진 예산 범위 내에서 어느 노드에 우선적으로 투자함으로써 전체 실패확률을 최소화할 것인지에 대한 최적화 모델을 제안한다. 모델 수립을 위해 다음과 같은 데이터 및 결정변수를 정의한다.

<Data/Decision Variable>

- c_i : 노드 i 에 투자할 경우 발생하는 비용
- p_i : 노드 i 에서의 성공적 대응 확률
- q_i : 노드 i 에 투자했을 때의 성공적 대응 확률 ($q_i > p_i$)
- B : 투자 가능한 예산
- x_i : 노드 i 의 성공적 대응확률을 높이기 위한 투자 여부(투자하면 1, 그렇지 않으면 0)

이를 바탕으로 가용 예산 범위 내에서 다층 대공방어 체계 전체의 대응 실패확률을 최소화하도록 투자 계획을 설립하는 모델은 다음과 같다.

$$\min \prod_{i=1}^n [1-p_i(1-x_i)-q_i x_i] \quad (2a)$$

$$s.t. \sum_{i=1}^n c_i x_i \leq B \quad (2b)$$

$$x_i \in \{0,1\}, i \in N \quad (2c)$$

목적함수 (2a)는 체계 전체의 대응 실패확률을 나타내며 이를 최소화한다. 여기서, 특정 노드 i 에 투자하면 해당 노드의 대응 성공확률은 p_i 가 아닌 q_i 의 값을 제시하도록 하며, 투자하지 않으면 기존 성공확률인 p_i 가 유지되도록 한다. 제약식 (2b)는 주어진 예산 범위 내에서 투자할 수 있도록 제한하며, 제약식 (2c)는 결정변수가 투자 유무를 결정하도록 0 또는 1의 값을 갖도록 제한한다. 제약식 (2b)는 정수계획법(integer program)에서 폭넓게 사용되고 있는 배낭형 제약(knapsack constraint)을 의미하며, 따라서 본 모델은 0 - 1 배낭형 문제(knapsack problem)로서 NP-hard 문제이다(Wolsey, 1998).

목적함수 (2a)는 비선형함수로서, 로그(log)함수를 이용하여 다음과 같이 선형화할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \log\left(\prod_{i=1}^n [1-p_i(1-x_i)-q_i x_i]\right) \\ &= \sum_{i=1}^n \log[1-p_i(1-x_i)-q_i x_i] \quad (3) \end{aligned}$$

또한, 로그함수는 단조증가함수이므로 목적함수 (2a)를 최소화하는 모델 대신 목적함수 (3)을 최소화하는 모델을 적용할 경우에도 동일한 최적해(x^*)를 보장하게 된다. 따라서 본 문제의 해법을 위하여 목적함수 (3)을 이용하고자 하며, 목적함수 (3)은 추가적으로 아래와 같이 정리될 수 있다.

$$\begin{aligned} & \log[1 - p_i(1 - x_i) - q_i x_i] \\ &= \log(1 - p_i) \cdot (1 - x_i) + \log(1 - q_i) \cdot x_i \\ &= \log(1 - p_i) + [\log(1 - q_i) - \log(1 - p_i)] x_i \\ &= \log(1 - p_i) + \left(\log \frac{1 - q_i}{1 - p_i} \right) x_i \end{aligned}$$

위 식의 첫 번째 등호는 일반적으로는 허용되지 않으나 x_i 가 0 또는 1의 값을 갖기 때문에 본 문제에서는 가능하다. 마지막으로, 음수를 양수화하기 위하여

$$\begin{aligned} -d_i &= \log(1 - p_i) < 0, \\ -r_i &= \log\left(\frac{1 - q_i}{1 - p_i}\right) < 0 \end{aligned}$$

로 치환하여 정리하면 목적함수 (3)은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \min \sum_{i=1}^n \{-d_i - r_i x_i\} &\Leftrightarrow \max \sum_{i=1}^n \{d_i + r_i x_i\} \\ &\Leftrightarrow \max \sum_{i=1}^n r_i x_i \end{aligned}$$

제시된 최종 모델은 전형적인 0-1 배낭형 문제로써 NP-hard 문제이나 동적계획법(dynamic programming)을 이용하여 $O(nB)$ 의 계산 복잡도를 갖는 유사다항 알고리즘(pseudo-polynomial time algorithm)으로 최적해를 도출할 수 있으며(Wolsey, 1998, pp.73), 또한 Dantzig (1957)가 제시한 그리디 근사 기법(greedy approximation algorithm)으로 근사해를 구할 수 있다. 동적계획법 알고리즘은 Fig. 4의 절차에 따라 진행하며, 그리디 근사 기법은 r_i/c_i 를 내림차순으로 정렬한 후 r_i/c_i 가 가장 높은 순으로 주어진 예산 B 를 초과하기 직전까지 해당하는 x_i 를 1로 할당하며 근사해를 구하는 방법이다.

```

Dynamic Programming Algorithm
Input : B, n, ci, ri, W
Output : V[n,B]
For (b=0 to B) V[0,b] = 0;
For (i=1 to n)
  for (b=0 to B)
    if ((ci ≤ b) & (ri + V[i-1,b-ci] > V[i-1,b]))
      {
        V[i,b] = ri + V[i-1,b-ci];
        keep[i,b] = 1;
      }
    else
      {
        V[i,b] = V[i-1,b];
        keep[i,b] = 0;
      }
  }
K = B;
For (i=n downto 1)
  if (keep[i,K] == 1)
    {
      output i;
      K = K - ci;
    }
Return V[n,B];
    
```

Fig. 4. Dynamic programming algorithm for solving the optimization model (2) (Wolsey, 1998, pp.73)

2.3 연속 최적 투자 모델

2.2절에서 제시한 최적 투자 모델이 특정 노드에서 투자 여부를 결정하는 이산 모델로 국한되는 반면, 본 절에서는 투자 여부를 결정하는 것에 추가하여 투자량을 고려한 연속 모델을 제시한다.

결정변수 x_i 는 더 이상 0 또는 1의 값을 갖는 것이 아니라 0보다 크거나 같은 값을 갖도록 허용하며 0보다 큰 값을 갖는 경우 실제 투자량을 의미하게 된다. 변형된 투자 모델의 가정 사항은 아래와 같다.

1. 각 노드에서의 투자량 x_i 에 따라 해당 노드에서의 성공적인 대응확률은 p_i 로부터 연속적으로 증가하며, 특정 노드에 투자량을 무한대($x_i = \infty$)로 투자할 경우 해당 노드에서의 대응확률은 이론적으로 1이 되도록 한다.
2. 성공적인 대응확률의 단위 증가량은 투자량이 늘어날수록 감소한다. 즉, 투자량에 따른 성공적 대응확률은 오목함수(concave function)를 따르도록 한다.

이를 바탕으로, 변형된 형태의 최적 투자 모델은 다음과 같이 표현 가능하다.

$$\min \prod_{i=1}^n [1 - q_i(x_i)] \tag{4a}$$

$$s.t. \sum_{i=1}^n c_i x_i \leq B \quad (4b)$$

$$x_i \geq 0, i \in N \quad (4c)$$

여기서, $q_i(x_i)$ 는 노드 i 에서의 성공적인 대응 확률이며 투자량 x_i 에 영향을 받는 함수로 구성된다. 또한 가정 사항에서 언급한 바와 같이 오목함수이면서 다음의 조건을 만족하는 함수로 표현되도록 한다.

$$q_i(x_i) = \begin{cases} p_i, & x_i = 0 \\ 1, & x_i = \infty \end{cases}$$

본 연구에서는 이러한 조건을 만족하면서 오목함수인 식 (5)의 $q_i(x_i)$ 를 고려한다.

$$q_i(x_i) = 1 - (1 - p_i)e^{-a_i x_i} \quad (5)$$

식 (5)의 $q_i(x_i)$ 는 위 조건을 만족함과 동시에, 노드 i 의 특성을 p_i 및 a_i 를 통해 반영할 수 있는 장점을 가지고 있다. 예를 들어, 특정 노드에 대하여 $p_i = 0.5$ 이며, $a_i = a$ 인 함수에서 a 를 0.2~1.0 사이의 값으로 변경해가며 함수 값의 변화를 관찰해 본다면 Fig. 5와 같이 나타나게 된다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이, 대응 성공확률 $q_i(x_i)$ 는 a_i 의 값에 따라 증가폭이 달라질 수 있다. 특히 a_i 가 1에 가까워질수록 적은 투자량으로 매우 높은 증가를 나타낼 수 있는 반면, 그 증가량 또한 급격히 감소함을 알 수 있다. 또한 a_i 가 0에 가까워짐에 따라 비교적 완만한 증가를 보이는 특징을 확인할 수 있다.

식 (5)의 $q_i(x_i)$ 를 목적함수 (4a)에 반영하였을 때, 목적함수 (4a)는 선형화할 수 있으며, 그 방법은 목적함수 (2a)를 선형화한 것과 유사하게 자연로그함수(ln)를 이용함으로써 다음과 같이 변형이 가능하다.

$$\begin{aligned} \ln\left(\prod_{i=1}^n [1 - q_i(x_i)]\right) &= \sum_{i=1}^n \ln [1 - q_i(x_i)] \\ &= \sum_{i=1}^n \ln [(1 - p_i)e^{-a_i x_i}] \\ &= \sum_{i=1}^n \{\ln(1 - p_i) + (-a_i x_i)\} \\ &= -a_i x_i - d_i \end{aligned}$$

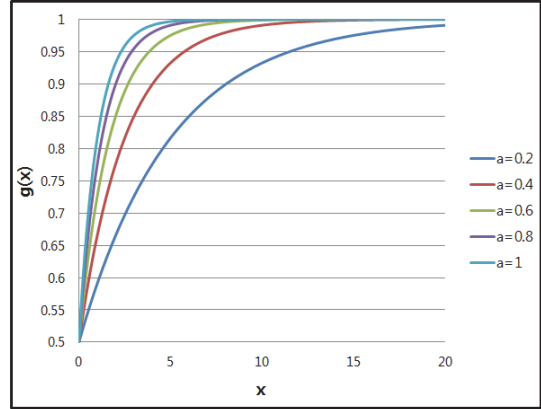


Fig. 5. Success probability function by varying the value of a

따라서, 목적함수 (4a)는

$$\begin{aligned} \min \sum_{i=1}^n \{-a_i x_i - d_i\} &\Leftrightarrow \max \sum_{i=1}^n \{a_i x_i + d_i\} \\ &\Leftrightarrow \max \sum_{i=1}^n a_i x_i \end{aligned}$$

로 정리되며, 최종적인 모델은 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$\max \sum_{i=1}^n a_i x_i \quad (6a)$$

$$s.t. \sum_{i=1}^n c_i x_i \leq B \quad (6b)$$

$$x_i \geq 0, i \in N \quad (6c)$$

모델 (6)은 단일 제약식을 갖는 선형계획법(linear program) 모델로서 쌍대문제(dual problem)를 이용하여 비교적 간단하게 최적해를 도출해낼 수 있다(Bertsimas & Tsitsiklis, 1997). 모델 (6)의 쌍대문제는 모델 (7)과 같다.

$$\min B\pi \quad (7a)$$

$$s.t. c_i \pi \geq a_i, i \in N \quad (7b)$$

$$\pi \geq 0 \quad (7c)$$

모델 (7)은 단일 결정변수(7c)를 가지며, 제약식 (7b)에 의해 최적해는 $\pi^* = \max_i \{a_i/c_i\}$ 로 쉽게 도출할 수 있다. 또한 Complementary Slackness Theorem (Bertsimas & Tsitsiklis, 1997, pp.151)에 의해 모델 (6)의 최적해를 구할 수 있으며 다음과 같다.

$$x_i^* = \begin{cases} B/c_i, & i \in \arg \max \{a_i/c_i\} \\ 0, & \text{all other } i \end{cases}$$

이 최적해가 의미하는 바는 비용 대비 효과(a_i/c_i)가 가장 높게 나타나는 노드에 모든 예산을 투자하는 것이 성공적인 대응확률을 최대화한다는 것이다. 뿐만 아니라 모델 (6)의 선형계획법을 심플렉스 방법(simplex method)에 의한 해법 측면에서 볼 때에도, 모델 (6)은 단일 제약식을 가지므로 기저변수(basic variable)는 1개만 발생하며 나머지는 모두 비기저변수(non-basic variable)로써 0의 값을 갖는다는 점과도 일치한다.

3. 계산 실험 및 결과 분석

2장에서 제시한 모델에 대한 계산 실험을 위해 Fig. 6과 같이 가상의 시나리오를 설정하였다. 먼저 대공위협인 미사일이 접근해오는 상황을 가정하고, 단계별로 중장거리 대응으로부터 마지막으로 근접방어무기체계 순으로 총 10가지의 다층 대공방어 체계로 구성하였다. 각각의 방어무기를 노드로 표현하고 해당노드에서의 대응 실패시 다음 노드에서의 대응이 이루어지며, 각 노드는 하드킬 또는 소프트킬 방식의 대응무기로 구분된다.

각 방어무기의 성공적 대응 확률과 예산은 실제 명중률의 공개가 불가능한 점과 하드킬 및 소프트킬 방어체계의 차이점을 고려하여 다음과 같이 임의로 설정하였다. 먼저,

각 방어무기의 성공적인 대응 확률(p_i)은 하드킬의 경우 $p_i \sim U[0.3,0.5]$, 소프트킬의 경우는 하드킬보다 조금 낮게 $p_i \sim U[0.2,0.4]$ 로 설정하여 균등분포(uniform distribution)를 따르는 확률변수에 의한 난수 발생으로 생성하였다. 이산 최적 투자 모델을 위해, 특정 노드에 투자할 경우 성공적인 대응 확률은 증가하게 되며 이 때 $q_i \sim U[0.6,0.8]$ (하드킬), $q_i \sim U[0.4,0.6]$ (소프트킬)로 각각 발생되도록 하였다. 투자비용 c_i 는 하드킬에 대하여 $c_i \sim U[20,30]$, 소프트킬은 $c_i \sim U[10,20]$ 으로 하여 소프트킬보다 하드킬의 투자비용이 조금 더 높게 설정되도록 하였다. 이 때 투자 총 예산 B 는 100으로 설정하였다. 마지막으로, 연속 최적 투자 모델을 위하여 식 (5)의 a_i 는 하드킬 또는 소프트킬의 구분 없이 $a_i \sim U[0.1,0.4]$ 로 설정하였다. 이렇게 랜덤으로 발생시킨 데이터들은 Table 1과 같이 나타난다. 여기서 r_i 는 로그 변환을 거친 이산 최적 투자 모델의 최종적인 목적함수 계수가 되며, r_i/c_i 는 그리디 근사 기법을 적용하기 위해 추가적으로 계산한 결과이고 a_i/c_i 는 연속 최적 투자 모델의 최적해를 도출하기 위해 구한 계산 값이다.

Table 1에 제시된 데이터를 이용하여 최적해를 도출한 결과는 다음과 같다. 먼저, 이산 최적 투자 모델의

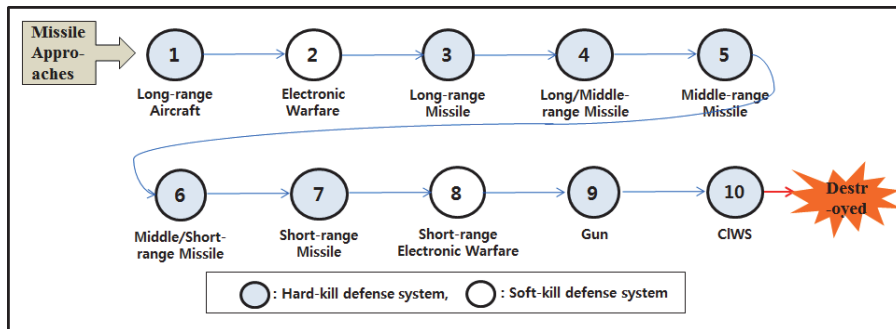


Fig. 6. Experimental design for layered air defense based on a virtual scenario

Table 1. Parameter for simulations

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
p_i	0.41	0.24	0.31	0.41	0.32	0.35	0.37	0.23	0.24	0.36
q_i	0.62	0.50	0.63	0.77	0.65	0.65	0.71	0.54	0.52	0.69
c_i	28.43	12.92	28.56	29.98	27.62	21.60	24.35	11.32	18.31	27.76
a_i	0.15	0.16	0.20	0.25	0.39	0.29	0.30	0.17	0.21	0.30
r_i	0.44	0.41	0.62	0.95	0.66	0.64	0.80	0.52	0.46	0.73
r_i/c_i	0.016	0.032	0.022	0.032	0.024	0.030	0.033	0.046	0.025	0.026
a_i/c_i	0.005	0.012	0.007	0.008	0.014	0.013	0.012	0.015	0.011	0.011

경우, Fig. 4의 동적계획법 알고리즘을 적용한 결과 $x_2^* = x_4^* = x_7^* = x_8^* = x_9^* = 1$ 로서 노드 2, 4, 7, 8, 9에 투자하는 것이 대응 실패 확률을 가장 최소화하는 것으로 나타났다. 또한 이렇게 투자함으로써 실패 확률이 0.0190에서 0.0008로 줄어들었으며 감소량은 0.0182로써 투자를 하지 않았을 때에 비해 95.5%의 실패 확률이 감소되는 효과가 발생하였다. 노드 2, 4, 7, 8, 9에 투자함으로써 발생한 비용은 96.88로서 전체 예산 100을 최대한 활용하였음을 알 수 있다. 같은 문제를 그리디 근사 기법을 적용할 경우, r_i/c_i 가 가장 큰 순서로부터 예산 100 이내에서 낮은 순으로 투자할 노드를 선택하게 되며 본 예제의 경우 동적계획법 알고리즘과 같은 결과를 얻게 되어 그리디 근사 기법 또한 최적해를 제공하게 된다. 다음으로, 연속 최적 투자 모델의 경우에는 a_i 가 목적함수 계수가 되며, x_i 는 비음의 실수이므로 모델 (6)의 선형계획법을 해결하는 문제가 되며 Table 1의 a_i/c_i 가 가장 큰 노드에 모든 예산을 투자하는 결과를 얻게 된다. 본 예제에서는 노드 8이 해당되어 $x_8^* = 8.83$ 으로 나타났다. 그리고 목적함수 값인 대응 실패 확률은 0.0190에서 0.004로 78.7% 감소하였다.

가용 예산의 변화가 최적 투자 모델에 미치는 영향을 추가적으로 분석해 보기 위하여, 예산을 20~200의 범위 내에서 20 단위로 증가시켜 가며 추가적으로 최적해를 도출해 보았다. 이 때 연속 최적 투자 모델은 예산의 변화에 따라 노드 8에 투자되는 양만 달라지므로, 추가적인 분석은 이산 최적 투자 모델에만 적용해 보았다.

Table 2는 이산 최적 투자 모델에 대하여 가용 예산을 변화시키며 최적해를 도출한 결과이다. 여기서 알 수 있듯이 예산이 증가될수록 투자를 위해 선택되는 노드가 늘어나며 이는 대응 실패 확률의 감소로 이어진다. 잔존 예

산은 가용 예산 범위 내에서 대응 실패 확률을 가장 낮출 수 있는 노드에 투자하게 되므로 가용 예산의 증가에 따른 일정한 패턴을 유지하지는 않는다. 또한 예산의 증가에 따라 선택되는 노드의 중복성 측면에서 보면, 대체로 적은 예산에서 선택된 노드가 많은 예산에서도 선택되는 경향을 보이지만, 반드시 그렇지는 않다. 이는 예산의 범위가 확대됨에 따라 비록 비용이 높아 선택되지는 않았지만 그 기여도가 높았던 노드들은 일부 변동되어 선택됨을 확인할 수 있다. 대표적으로 노드 6은 가용 예산이 40 이하인 경우 선택되지 않았다가 60일 때 선택되고 다시 80~100인 경우는 선택되지 않는 결과를 보이고 있다. 마지막으로, 대응 실패 확률은 가용 예산의 증가에 따라 증가하지만 그 증가폭은 감소함을 알 수 있으며, Fig. 7과 같이 나타났다.

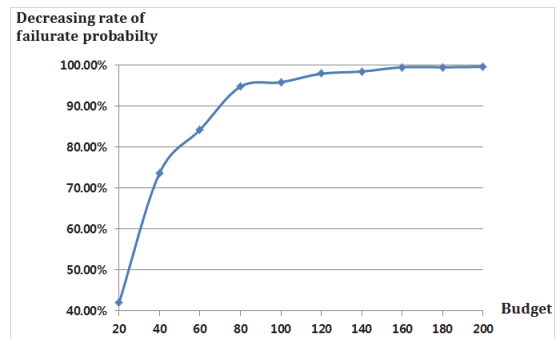


Fig. 7. Decreasing rate of failure probability compared to the initial failure probability (before investment) according to the given budget

4. 결론 및 향후 연구 과제

본 연구에서는 대공위협을 효과적으로 방어하기 위한

Table 2. Sensitivity analysis for discrete model by varying budget from 20 to 200 with interval of 20

Budget	Selected nodes for investment	Residual budget	Failure probability after investment	Decreasing rate of failure probability
20	8	8.69	0.0110	42.11%
40	7, 8	4.33	0.0050	73.68%
60	6, 7, 8	2.74	0.0030	84.21%
80	2, 4, 7, 8	1.43	0.0010	94.74%
100	2, 4, 7, 8, 9	3.12	0.0008	95.79%
120	2, 4, 6, 7, 8, 9	1.52	0.0004	97.89%
140	4, 5, 7, 8, 9, 10	0.66	0.0003	98.42%
160	2, 4, 5, 6, 7, 8, 10	4.45	0.0001	99.47%
180	2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10	6.14	0.0001	99.47%
200	3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10	10.50	0.00008	99.58%

다층 대공방어 체계의 최적 투자 계획 모델을 제시하였다. 다층 대공방어 체계를 네트워크로 표현하고 각 단계별 대응은 독립적으로 이루어짐을 가정하여 다층 대공방어 체계 전체의 신뢰도 향상을 위한 투자 계획 모델을 이산형 모델과 연속형 모델로 구분하여 제안하였으며, 최적화 모델이 포함하는 비선형 함수를 로그함수를 이용하여 선형화함으로써 제안한 모델이 배낭형 문제와 동일함을 확인하였고, 이에 따라 그 해법도 배낭형 문제의 해법으로 접근할 수 있음을 보여주었다.

다층 대공방어 체계와 같은 단계적 대응은 이와 유사한 특성을 가지고 있는 체계에도 적용될 수 있다. 예를 들어, 수중위협에 대한 수중방어 체계(Shin et al., 2016)의 경우 어뢰로부터 생존성을 보장하기 위해 회피기동과 함께 기만기를 발사함으로써 어뢰가 단계적으로 함정의 대응체제와 접하게 되므로 유사하다고 할 수 있다. 또한 재난재해 대응을 위한 시스템의 경우, 재난관리 컨트롤 타워, 법 및 규제 제정, 안전점검 및 안전 분야 전문성 강화, 재난예방 조치(교육훈련, 매뉴얼 등)의 과정을 거치고 재난이 발생 시에는 재난대응활동, 현장 조치 등을 통해 재난 피해를 최소화하고자 하므로 재난대응 시스템 또한 단계적인 대응이 가능하다. 본 연구의 결과가 이와 같은 시스템에 활용이 가능하다면 해당 시스템의 신뢰도 향상에 도움이 될 것으로 기대된다.

그러나 본 연구에서 가정된 각 대응단계별 독립성이 보존되지 않는 시스템에 적용할 경우에는 종속성으로 인한 추가적인 고려사항이 도출될 수 있다. 또한 본 논문에서는 사건의 발생 결과가 성공 또는 실패라는 두 가지만 고려하였으나, 현실 문제에 많은 사건들은 성공적인 대응이 이루어지지 않았을 경우 여러 가지 발생 가능한 결과들을 내포하고 있으므로, 그에 대한 고려도 필요할 것이다. 이러한 경우, 대응 결과에 따른 여러 사건이 발생됨을 고려하여 보다 일반화된 네트워크의 적용이 요구되며, 사건 결과는 확률적으로 발생하므로 네트워크상 확률적으로 다음 단계로 이어지는 상황을 마코프 모델 등으로 표현할 필요가 있다. 본 연구에서 이루어진 가정 사항과 모델을 좀 더 현실적인 부분을 반영하는 모델로 발전시킬 수 있다면 보다 가치 있는 결과를 도출할 수 있을 것으로 기대된다.

References

Ahuja, R. K., T. L. Magnanti, J. B. Orlin. *Network Flows: Theory, Algorithms, and Applications*,

Prentice Hall, 1993.

Bertsimas, D., J. N. Tsitsiklis. *Introduction to Linear Optimization*, Athena Scientific, 1997.

Choi, S.-L., D.-K. Park. (2014) "A Study on Securing Ship Survivability focused on a Cost and Effectiveness Analysis for Air Defense Performance", *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 15(5), 2579-2586.

(최성린, 박동기 (2014) “대공방어성능에 대한 비용 효과분석을 중심으로 한 함정생존성 확보방안 연구”, 한국산학기술학회논문지, 15(5), 2579-2586).

Dantzig G. B. (1957), "Discrete-Variable Extremum Problems", *Operations Research* 5(2), 266-288.

Hwang, K.-C. (2007) "Anti Air Warfare Analysis & Design of the Patrol Killer Experiment Combat System by the Model-Based-Simulation", *Journal of the Korea Society for Simulation*, 16(4), 23-31.

(황근철 (2007) “모델 기반의 시뮬레이션 기법을 이용한 차기 고속정용 전투체계 대공전 기능의 분석 및 설계”, 한국시뮬레이션학회 논문지, 16(4), 23-31).

Hwang, S.-J. (2006) "A Position of a Anti-Air Weapon System for Fighting Ship's Self-Defense Effectiveness Enhancement", *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, 9(3), 41-47.

(황수진 (2006) “대공방어무기체계의 교전 효과도 향상을 위한 함상 배치 위치 분석”, 한국군사과학기술학회지, 9(3), 41-47).

Jang, W. R., K. K. Park, C.-K. Ryoo (2016), "Medium/Short Hard-kill Anti-Air Defense Strategy for Warship against Multiple Anti-Ship Missiles", In *Proceedings of the Fall Conference on the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, 932-933.

(장우림, 박국권, 유창경 (2016) “다수 대함유도탄에 대한 함정의 중·단거리 Hard-Kill 방어체계 운용기법 연구”, 한국항공우주학회 2016년도 추계학술대회 논문집, 932-933).

Kang, D. K. (1994), "A Layered Air Defense System for Warships", *National Defense and Technology* 180, 50-65.

(강동균 (1994) “해상의 다층 대공방어 무기체계”, 국방과 기술, 180, 50-65).

Kim, D., J. Yun, C.-K. Ryoo. (2011) "Defense Strategy

against Multiple Anti-Ship Missiles using Anti-Air Missiles", *Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, 39(4), 354-361.

(김도완, 윤중섭, 유창경 (2011) “다수 대함유도탄에 대한 함정의 대공방어유도탄 운용기법 연구”, *한국항공우주학회지*, 39(4), 354-361).

Kim, S.-W., B.-K. Kim. (2014) "An Analysis on the Performance of the Close-In-Weapon-System Using Absorbing Markov Chains", *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, 17(6), 733-743.

(김성우, 윤봉규 (2014) “흡수 마코프체인을 활용한 함정 근접무기체계 효과성 분석”, *한국군사과학기술학회지*, 17(6), 733-743).

Lee, S.-H., I.-C. Jeong. (2006) "Optimal Allocation Model of KDX for Missile Defense", *Journal of the*

Korea Society for Simulation, 15(4), 69-77.

(이상현, 정인철 (2006) “미사일 방어를 위한 KDX 최적배치모형 연구”, *한국시뮬레이션학회 논문지*, 15(4), 69-77).

Shin, M., H. Cho, J. Lee, J.-S. Lim, S. Lee, W.-J. Kim, W. S. Kim, W. Hong. (2016) "Effectiveness Analysis for Survival Probability of a Surface Warship Considering Static and Mobile Decoys", *Journal of the Korea Society for Simulation*, 25(3), 53-63.

(신명인, 조현진, 이진호, 임준석, 이석진, 김완진, 김우식, 홍우영 (2016) “부유식 및 자항식 기만기의 혼합 운용을 고려한 수상함의 생존율에 대한 효과도 분석”, *한국시뮬레이션학회 논문지*, 25(3), 53-63).

Wolsey, L. A. *Integer Programming*, John Wiley & Sons, Inc., 1998.



이진호 (jinho7956@gmail.com)

2002 해군사관학교 전기공학 학사
2006 연세대학교 산업공학 석사
2012 University of Texas at Austin 경영과학 박사
2012~ 현재 해군사관학교 국방경영학과 교수

관심분야 : 확률적 최적화, 시뮬레이션, 네트워크 최적화



정석문 (linosmchung@gmail.com)

1985 부산대학교 전자공학 학사
1987 부산대학교 전자공학 석사
1994 부산대학교 전자공학 박사
1993~ 현재 해군사관학교 무기체계공학과 교수

관심분야 : 광전자공학, 위성통신, 전투체계, 운용전술 효과도