

대함유도탄 요격 확률을 고려한 함정 대공방어유도탄의 최적 운용 연구

박현우^{*,1)} · 이한민¹⁾

¹⁾ 국방과학연구소 제1기술연구본부

A Study on Optimal Operation against Anti-Air Missiles with Consideration of Anti-Surface Missile Kill Probability

Hyeonwoo Park^{*,1)} · Hanmin Lee¹⁾

¹⁾ The 1st Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 18 July 2019 / Revised 20 November 2019 / Accepted 25 November 2019)

ABSTRACT

A naval surface-to-air missile is an effective countermeasure against increasing threats of anti-ship missiles. Optimal operation is imperative for high survivability due to limited defense resources of a warship. This paper addresses a problem of optimal engagement to maximize the overall probability of intercept under Shoot-Look-Shoot tactics. The problem is formulated and analyzed with consideration of a realistic single-shoot probability model. The analysis shows that a global solution is achieved for some engagement scenarios. A numerical algorithm to optimize the overall probability of intercept is suggested. An illustrative example is provided to verify our results.

Key Words : Optimization of Shoot-Look-Shoot(Shoot-Look-Shoot 교전의 최적화), Numerical Analysis(수치해석), Anti-Air Missile(대공방어유도탄), Anti-Surface Missile(대함유도탄)

1. 서론

대함유도탄은 1950년대에 개발되기 시작하여 1960년대부터 실전에 운용되었다. 이후 해전은 대함포전에서 대유도탄전으로 양상이 점차 변화하였고, 중동전, 포클랜드전 등에서 대함유도탄이 함정을 피격하면서 대함유도탄의 효과와 위력이 입증되었다. 그 결과 대

함유도탄은 현재까지 함정에 치명적인 위협 중에 하나이다¹⁾.

대함유도탄은 과학기술이 발전함에 따라 점차 고속화되어가고 있고, 함정은 탑재 공간의 한계로 인하여 보유할 수 있는 방어무기는 제한적이다. 이에 대공방어유도탄 자체 성능 향상뿐만 아니라 제한된 자원을 효율적으로 사용할 수 있는 방안에도 대해서도 지속적으로 연구가 되어왔다. 대공방어유도탄의 효과적인 운용전략을 수립하기 위한 연구로는 교전 혹은 임무급 시뮬레이션 모델로 전투실험을 통하여 방어 효과도를

* Corresponding author, E-mail: n-hyeon@hanmail.net
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

분석하고 이를 통하여 최적의 운용 기법을 도출하는 방법이 주로 이용되고 있다^{2,4)}. 이러한 교전 M&S (Modeling&Simulation)를 통하여 방어 효과도를 분석하는 기법은 복잡하고 다양한 환경을 고려할 수 있으나, 도출된 해는 실험에 기반한 값으로써, 각 교전요소에 대한 이론적 특성을 고찰하는데 어려움이 있다. 또 다른 연구로는 단순 시간 영역으로 교전가능 범위 내에 무장을 운용하는 연구가 있다⁵⁾. 이와 같은 연구에서는 함정 대공방어유도탄의 요격 확률을 고정 값으로 가정하여 지나치게 단순화되는 측면이 있다.

본 논문에서는 기존 연구와 다르게 교전 거리 및 표적 속도에 따라 변하는 요격 확률 모델을 기반으로 함정 대공방어유도탄의 대함유도탄 요격 확률을 최대화하는 문제를 정식화하고 이에 대한 특성을 고찰하였으며, 최적화 문제에 대한 수치 알고리즘을 제시하였다. 이를 통하여 앞서 문헌에서 요격 확률 모델을 단순화하여 간과되었던 표적에 따른 요격 확률의 변화와 교전 환경이 너무 복잡하여 정립할 수 없었던 교전간의 상관관계를 정식화하고 수치적으로 분석하였으며, 이는 함정 대공방어유도탄의 효과적이고 효율

적인 운용에 활용이 가능하다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 대함유도탄과 대공방어유도탄 운용 개념을 정의하였으며, 3장에서는 요격 확률 극대화를 위한 문제를 수학적으로 정식화하였으며 이에 대한 분석을 수행하였다. 4장에서는 정식화된 문제를 해결하기 위한 최적화 알고리즘을 제시하였고, 5장에서는 수치 예제를 통하여 연구결과를 검증하였다. 마지막으로 6장에서 결론을 맺는다.

2. 대함유도탄의 운용개념

대함유도탄의 운용개념은 Fig. 1과 같다. 대함유도탄은 함정에 접근 시 레이더의 탐지를 피하기 위해 해면밀착 비행으로 함정에 접근한다. 이때 대함유도탄은 함정의 대응 시간을 줄이기 위해 빠른 속도로 함정에 접근하거나 요격을 피하기 위해 회피 기동을 수행한다. 본 논문에서의 표적은 대함유도탄의 요격 확률을 정식화하기 위해 등속운동을 하는 대함유도탄으로 가정한다.

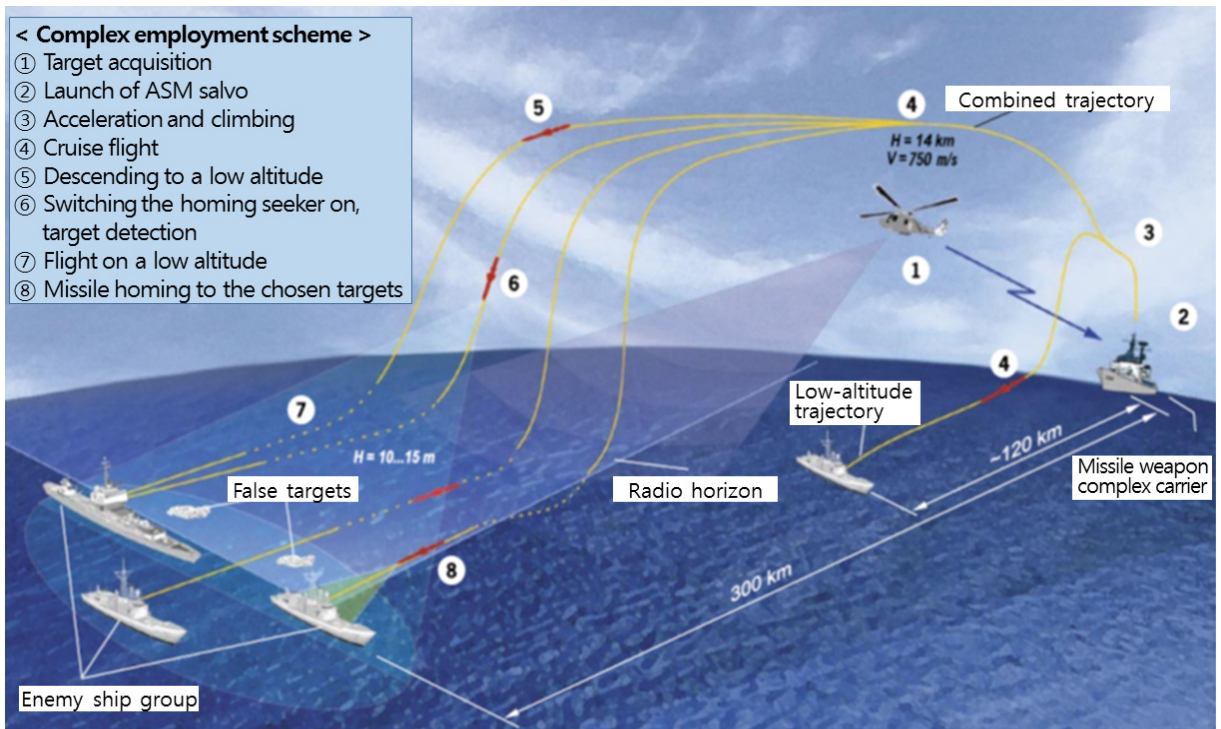


Fig. 1. Operation concept of ASM(Anti-Ship Missile)^[6]

대공방어유도탄의 효과적인 운용을 위해서는 함정의 유도탄 탑재 공간 제한을 고려하여야 한다. 일반적으로 교전 거리가 충분히 확보된 상황에서는 연속 발사(Shoot-Shoot)보다는 첫 번째 교전 이후 명중 성공 여부에 따라 재교전을 수행하는 유도탄 운용 방식(Shoot-Look-Shoot)이 유도탄 자원을 효율적으로 사용하는 방식으로 알려져 있다⁷⁾.

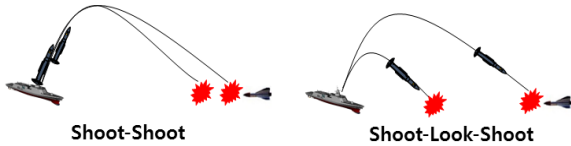


Fig. 2. Anti-air missile operation concept

본 논문에서는 Shoot-Look-Shoot 운용 방식으로 대공방어유도탄의 요격 확률을 극대화할 수 있는 첫 번째 교전 거리에 대해 분석한다. 두 번째의 교전 거리는 첫 번째 교전 거리에 의존적이고, 교전 거리에 따라 요격 확률이 변화하기 때문에 두 번째 요격 확률까지 고려한 첫 번째 교전의 최적의 요격 지점을 산출한다.

3. 수학적 모델 및 분석

2장에서 기술된 요격 확률 극대화 문제는 유도탄의 각 발사(Shoot)를 독립시행으로 간주함으로써 다음과 같은 최적화 문제로 정식화 될 수 있다.

$$J = \max (1 - P(r_1)) \cdot P(r_2) - P(r_1) \quad (1)$$

subject to

$$r_2 = r_1 - V_t \cdot (FT(r_2) + T_{re} + t_{look}) \quad (2)$$

$$R_{bound} \leq r_1 \leq R_{max} \quad (3)$$

$$R_{bound} \equiv R_{min} + V_t \cdot (FT(R_{min}) + T_{re} + t_{look}) \quad (4)$$

P : 교전 거리에 따른 대공방어유도탄의 대함유도탄 요격 확률

FT : 대공방어유도탄의 교전 거리에 따른 비행시간

V_t : 표적 속도(km/s)

T_{re} : 대공방어유도탄 재발사 시간(s)

t_{look} : 명중평가 시간(s)

R_{max} : 대공방어유도탄 최대사거리(km)

R_{min} : 대공방어유도탄 최소사거리(km)

r_1 : 첫 번째 교전 거리(km)

r_2 : 두 번째 교전 거리(km)

식 (1)은 첫 번째 교전 요격 확률과 첫 번째 교전에 대해 요격이 실패했을 때 두 번째 교전 요격 확률까지 고려한 Shoot-Look-Shoot의 요격 확률을 최대화하기 위한 목적 함수이며, 식 (2)는 2차 교전이 일어나는 사거리에 대한 구속조건을 기술한 함수로써, 2차 교전 거리는 첫 번째 교전 거리에서 표적 속도와 명중평가, 재발사 시간 및 두 번째 교전까지의 비행시간을 고려한 표적 진입 거리의 차로 표현된다. Shoot-Look-Shoot 교전을 수행하기 위해서는 두 번째 교전 거리가 대공방어유도탄 최소사거리 이상에서 수행되어야 하는데, 이는 1차 교전 거리의 하한계(Lower bound)가 존재함을 의미한다. 이러한 1차 교전 거리의 제한 사항은 식 (3)과 같으며, 하한계는 식 (4)와 같이 정의한다.

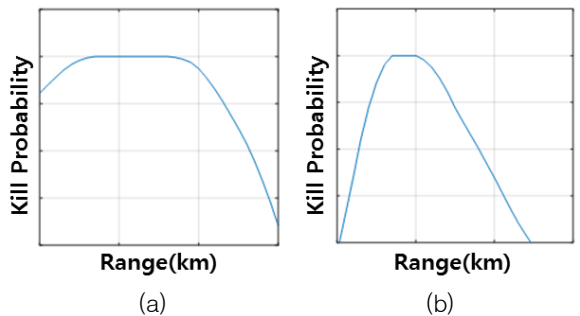


Fig. 3. Kill probability when (a) target is low speed and (b) high speed

한편, 함정 대공방어유도탄은 교전 거리가 증대할수록 가용한 기동력의 저하로 요격 확률이 저하되고, 또한 근접 교전의 경우 높은 초기 회전 요구, 추진구간에서의 교전 가능성 등의 요인으로 요격 확률이 저하되는 특징을 보인다. 이러한 특징을 종합하여 볼 때, 함정 대공방어유도탄의 요격 확률은 오목 함수(Concave function)로 근사 할 수 있음을 예측할 수 있다. 이러한 특징은 공학 수준(Engineering Level)의 M&S 방법

으로써 유도탄의 실 교전환경을 충실하게 반영한 대공방어유도탄의 6자유도 프로그램을 이용하여 산출한 거리별 요격 확률 분포에서도 확인할 수 있다. Fig. 3에서 보이듯이 요격 확률은 오목 함수의 형태를 보인다. 표적 속도에 따라 그 확률 분포가 변화하는 특성을 나타내는 것은 표적 속도가 빠를수록 최대 요격 확률의 영역이 감소하기 때문이다.

대공방어유도탄의 교전 거리에 따른 비행시간은 Fig. 4와 같이 비선형 함수이다. 첫 번째 교전 거리와 두 번째 교전 거리의 관계식인 식 (2)를 편의상 식 (5)와 같이 표현한다. β 는 표적의 속도와 2차 교전에 소요되는 시간으로 표현되는 값이다.

$$r_2 = r_1 - \beta, \quad \beta = V_t \cdot (FT(r_2) + T_{re} + t_{look}) \quad (5)$$

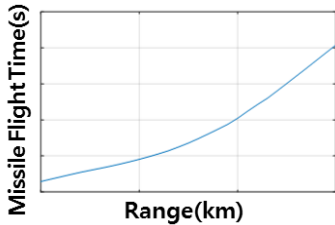


Fig. 4. Flight time of anti-air missiles by distance

이제 이러한 오목 함수 형태의 요격 확률을 가진 유도탄의 요격률 극대화 문제에서 목적 함수의 특징을 분석함으로써 최적화 문제의 특성을 고찰하고자 한다. 단일 요격 확률이 오목 함수의 형태이라도 목적 함수는 오목 함수가 아닐 수 있다. 하지만, 특정 조건 하에서 해당 문제는 최적해의 전역성이 보장되는 비선형 컨벡스 최적화 문제(Non-linear convex optimization problem)로 간주 될 수 있다. 이제, 요격 확률 극대화 문제가 비선형 컨벡스 최적화 문제이기 위한 조건을 살펴본다. $P(r_1) = f, P(r_2) = g$ 라 정의하고 목적 함수가 오목 함수가 될 조건을 유도하기 위하여 Jensen's inequality를 고려한다.

$$g(\lambda x + (1-\lambda)y) - g(\lambda x + (1-\lambda)y) \cdot \frac{f(\lambda x + (1-\lambda)y) + f(\lambda x + (1-\lambda)y)}{f(\lambda x + (1-\lambda)y) + f(\lambda x + (1-\lambda)y)} \\ \geq \lambda g(x) + (1-\lambda)g(y) - (\lambda g(x) + (1-\lambda)g(y)) \cdot \frac{(\lambda f(x) + (1-\lambda)f(y)) + \lambda f(x) + (1-\lambda)f(y)}{\lambda f(x) + (1-\lambda)f(y)} \\ f, g : S \rightarrow R, \forall x, y \in S, \forall S \in [R_{bound}, R_{max}], \forall \lambda \in [0, 1] \quad (6)$$

목적 함수는 식 (6)을 만족해야 오목 함수이다.

항상 $R_{bound} \geq \beta$ 이기 때문에 f, g 는 $[R_{bound}, R_{max}]$ 에서 오목 함수로 식 (7), (8)를 만족한다.

$$f(\lambda x + (1-\lambda)y) \geq \lambda f(x) + (1-\lambda)f(y) \quad (7)$$

$$g(\lambda x + (1-\lambda)y) \geq \lambda g(x) + (1-\lambda)g(y) \quad (8)$$

식 (7), (8)로 식 (6)을 정리하면 식 (9)와 같다.

$$g(\lambda x + (1-\lambda)y) \cdot f(\lambda x + (1-\lambda)y) \leq (\lambda g(x) + (1-\lambda)g(y)) \cdot (\lambda f(x) + (1-\lambda)f(y)) \quad (9)$$

따라서, 식 (9)는 목적 함수가 오목 함수가 될 조건이며, 이는 다음의 조건이 만족할 경우 성립한다.

$$\lambda(1-\lambda)(f(y) - f(x))(g(x) - g(y)) \leq 0 \quad (10)$$

식 (10)을 성립하기 위한 조건은 아래와 같다.

- (1) f, g 가 둘 다 증가하는 경우
- (2) f, g 가 둘 다 감소하는 경우
- (3) f 가 일정한 경우
- (4) g 가 일정한 경우

이러한 조건을 정규화하기 위하여 R_{s1}, R_{s2} 를 다음과 같이 정의한다.

$$R_{s1} = \min \arg \max P(r) \quad (11)$$

$$R_{s2} = \max \arg \max P(r) \quad (12)$$

R_{s1} 은 요격 확률이 최고점에 도달하는 교전 거리이고, R_{s2} 는 요격 확률이 최고점에서 감소하는 교전 거리이다. 위의 유도와 같이 목적 함수가 오목 함수가 아닌 경우는 f 가 증가일 때 g 는 감소, f 가 감소일 때 g 는 증가인 경우인데 $\beta > R_{s2} - R_{s1}$ 일 때 발생한다. 이는 첫 번째 교전과 두 번째 교전의 최대 요격 확률이 중첩되지 않는 경우이다. 따라서 Shoot-Look-Shoot 교전에 대한 요격 확률 극대화 문제는 다음의 특징을 보인다.

- $\beta \leq R_{s2} - R_{s1}$ 인 경우 비선형 컨벡스 최적화 문제
- $\beta > R_{s2} - R_{s1}$ 인 경우 비선형 비컨벡스 최적화 문제

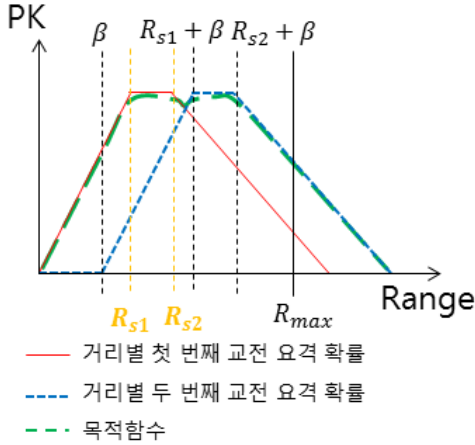


Fig. 5. When the objective function is not a concave function

Fig. 5는 목적 함수가 오목 함수가 아닌 경우를 나타낸다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 첫 번째 교전과 두 번째 교전의 최대 요격 확률이 중첩되지 않아 목적 함수가 오목 함수가 아닌 경우가 존재하고, R_{s2} 에서 $R_{s1} + \beta$ 의 구간에서 목적 함수가 오목 함수의 조건을 만족시키지 못하는 경우가 발생한다. 이 경우, 여러 지역해가 존재하게 된다.

β 는 식 (5)에서 보는 바와 같이 표적 속도(V_t)에 의존적이고 요격 확률에서 일정한 값으로 유지하는 구간($R_{s2} - R_{s1}$)도 표적속도에 따라 달라진다. 표적 속도가 빠를수록 β 는 커지고 $R_{s2} - R_{s1}$ 는 작아져서 목적 함수가 오목 함수가 아닌 경우가 발생한다. 또한, β 는 표적 속도뿐만 아니라 명중평가 시간(t_{look})에도 의존적인데 명중평가 시간이 길어질수록 β 는 커지게 되고 목적 함수는 비선형 컨벡스 최적화 문제에서 비선형 비컨벡스 최적화 문제로 바뀌게 된다.

이상을 종합하면, 요격 확률 극대화 문제는 표적의 속도와 명중평가 시간에 의하여 문제의 특성이 변화하는 것을 확인할 수 있다. 즉, 저속 표적과의 교전의 경우 혹은 명중평가 시간이 짧은 경우, 요격 확률 최대화 문제는 컨벡스 최적화 문제의 형태를 가지며, 이에 따라 최적화 문제에 전역해가 존재함을 확인할 수 있다. 한편, 고속 표적과의 교전의 경우, 혹은 명중평가

소요 시간이 긴 경우, 최대화 문제는 다수의 지역해를 가지는 비선형 비컨벡스 최적화 문제(Non-linear non-convex optimization problem)로 정식화됨이 확인된다.

4. 최적화 수치 알고리즘

요격확률 최적화 문제를 수치적으로 풀기 위해서 본 논문에서는 비선형 오목 함수뿐만 아니라 비선형 오목 함수가 아닌 목적 함수에 적합한 Interior-Point 알고리즘을 사용한다. Interior-Point 알고리즘은 1960년대 초 Anthony V. Fiacco와 Garth P. McCormick에 의해 고안되었다^[8,9]. Interior-Point 알고리즘은 배리어 함수(Barrier function)를 생성하여 목적 함수를 제한조건으로 제한하는 것이다. 배리어 함수는 식 (13)과 같은 특징을 근사화 했으며, 최적 해를 찾는 과정을 가용해(Feasible solution) 내에서만 반복하도록 제한한다.

$$I_c(x) = \begin{cases} \infty, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases} \quad (13)$$

Interior-Point 알고리즘은 시간 복잡도(Time complexity) 측면에서 효율적인 알고리즘이다. 식 (14)와 같이 주어진 최적화 문제를 식 (15)와 같은 배리어 함수를 생성하여 식 (16)으로 변형하여 최적 값을 구한다. 배리어 함수에 해의 경계의 접근을 통감하기 위해 $1/t$ 이 추가되는데, 큰 값의 $1/t$ 은 가용해의 분석적 중심을 제공하고 $1/t$ 가 “0”에 가까워짐에 따라 중심 경로를 추적하여 최적 값을 계산한다. 이는 식 (17)과 같다.

$$\min f(x), \text{ subject to } h(x) = 0 \text{ and } \sum_{i=1}^m g_i(x) \leq 0 \quad (14)$$

$$\Phi(x) = - \sum_{i=1}^m \log(-g_i(x)) \quad (15)$$

$$\min f(x) + \frac{1}{t} \Phi(x) \quad (16)$$

$$\text{subject to } h(x) = 0$$

$$\lim_{1/t \rightarrow 0} x^*(t) = x^* \quad (17)$$

Interior-Point 방법의 알고리즘은 Fig. 6과 같다.

1. $t^{(0)} > 0$ 인 $k = 0$ 에서 초기값 t 를 선택한다.
2. $t = t^{(0)}$ 에서 Newton's method로 식 (17)을 풀어서 $x^{(0)} \cong x^*(t)$ 을 구한다.
3. While $m/t > \varepsilon$
4. $t^{(k+1)} > t^{(k)}$ 로 업데이트 한다.
 $(t^{(k+1)} = \mu t^{(k)}, (\mu > 1))$
5. $t = t^{(k+1)}$ 에서 Newton's method로 식 (17)을 풀어서 $x^{(k+1)} \cong x^*(t)$ 을 구한다.
6. end while

Fig. 6. Pseudo algorithm of interior-point method

5. 시뮬레이션을 통한 검증

자함을 공격하는 대함유도탄을 요격하기 위한 함정 대공방어유도탄의 Shoot-Look-Shoot 운용 방식은 Fig. 7과 같다. 1차 교전 이후 명중평가와 재발사 시간을 거쳐 2차 교전을 수행한다. 3장에서 두 번째 요격 확률까지 고려한 첫 번째 교전의 최적의 요격 지점을 산출하는 최적화 문제를 정식화하였고, 본 장에서는 교전 거리와 표적 속도에 따라 변화하는 요격 확률 모델을 이용하여 4장에서 제시한 수치 알고리즘을 통하여 이론적 결과를 검증한다. 이를 위해 표적 속도와 명중평가 시간을 다르게 하여 시뮬레이션을 수행하였다. 수치 시뮬레이션에 적용된 거리별 요격 확률과 거리별 비행시간은 Fig. 3과 Fig. 4와 같다.

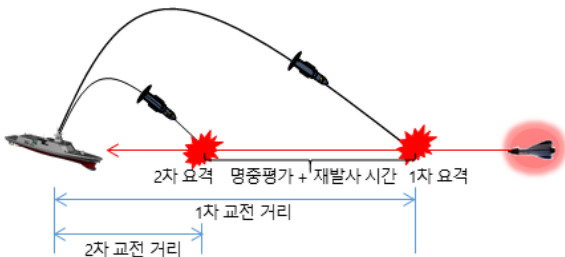


Fig. 7. Shoot-Look-Shoot engagement concept

우선, 표적이 저속이고 명중평가 시간이 T 일 때 거리별 첫 번째 교전 요격 확률과 거리별 두 번째 교전 요격 확률을 산출하였는데 이는 Fig. 8과 같다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 첫 번째 교전 요격 확률의 최대

구간 $[R_{s1}, R_{s2}]$ 과 두 번째 교전 요격 확률의 최대 구간 $[R_{s1} + \beta, R_{s2} + \beta]$ 이 중첩되고 이것은 전체 구간에서 목적 함수가 오목 함수이기 위한 조건 $\beta \leq R_{s2} - R_{s1}$ 를 만족한다. 따라서 표적이 저속이고 명중평가 시간이 T 일 때는 비선형 컨벡스 최적화 문제이다.

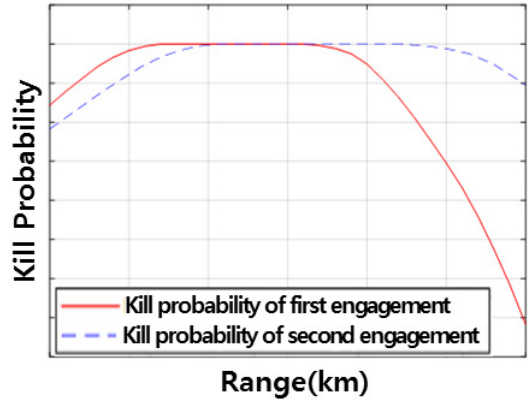


Fig. 8. Kill probability the first and second engagement by range when target is low speed and kill-assessment is T

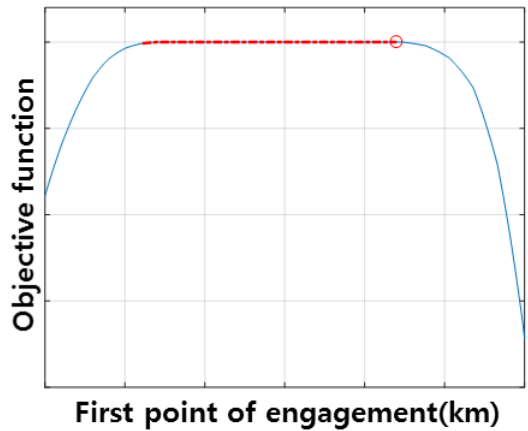


Fig. 9. Objective function, optimal point within feasible solutions when target is low speed and kill-assessment is T

목적 함수는 Fig. 9와 같고 앞서 분석한 바와 같이 목적 함수는 오목 함수이다. Fig. 9에서 원형의 점은 전역해로 Interior-Point 알고리즘으로 구한 값이다. 점선은 첫 번째 교전 가능 영역으로 R_{bound} 에서 R_{max} 까

지 목적 함수 값이다. 점선의 x축 값은 가용해(Feasible solution)의 집합으로 전역해는 가용해의 동일한 큰 값 중에서 자함으로 가장 멀리 떨어진 지점으로 R_{max} 와 같다. 같은 확률이라면 자함에서 멀리서 교전을 수행하는 것이 함정의 대공 방어 측면에서 유리한데, Interior-Point 알고리즘을 통해 비선형 컨벡스 최적화 문제에서 최적 값을 찾을 수 있음을 확인하였다.

명중평가 시간은 동일하고 표적 속도를 고속으로 변화시킬 때 거리별 첫 번째 교전 요격 확률과 거리별 두 번째 교전 요격 확률은 Fig. 10과 같다. 표적 속도가 빨라 첫 번째 교전 요격 확률의 최대 구간 $[R_{s1}, R_{s2}]$ 과 두 번째 교전 요격 확률의 최대 구간 $[R_{s1} + \beta, R_{s2} + \beta]$ 이 중첩되지 않는다. 이는 다수의 지역해가 존재하는 $\beta > R_{s2} - R_{s1}$ 의 조건으로 목적 함수는 오목 함수가 아니다.

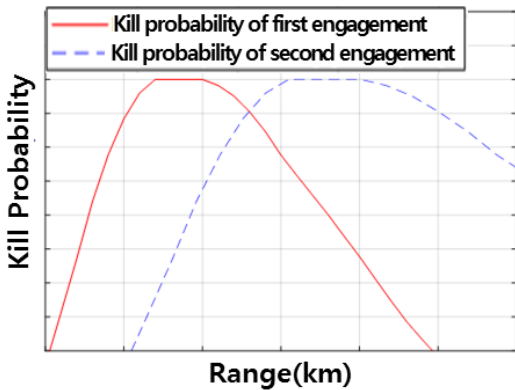


Fig. 10. Kill probability the first and second engagement by range when target is high speed and kill-assessment is T

이때의 목적 함수는 Fig. 11과 같고, Interior-Point 알고리즘으로 구한 최적 값은 원형의 점이다. 점선은 첫 번째 교전 가능 영역으로 R_{bound} 에서 R_{max} 까지 목적 함수 값이다. 점선의 x축 값은 가용해(feasible solution)의 집합이다. 3장에서 분석한 바와 같이 f 가 증가일 때 g 는 감소, f 가 감소일 때 g 는 증가인 구간에서 목적 함수가 오목 함수의 조건을 만족시키지 못 하였다. 이는 가용해에 포함되는 구간으로 가용해를 확대해서 본 결과, 목적 함수가 오목 함수가 아님을 확인하였다. 목적 함수가 오목 함수가 아님에도 Interior-Point 알고리즘은 수렴 해를 산출하였고, 이는 Shoot-Look-

Shoot 교전의 요격 확률을 극대화하는 첫 번째 교전 거리로 동일한 요격 확률 중에서 자함에서 멀리 떨어진 지점으로 최적 해이다. 다수의 지역해가 존재하는 비선형 최적화 문제에서도 Interior-Point 알고리즘이 효과적으로 동작함을 확인하였다.

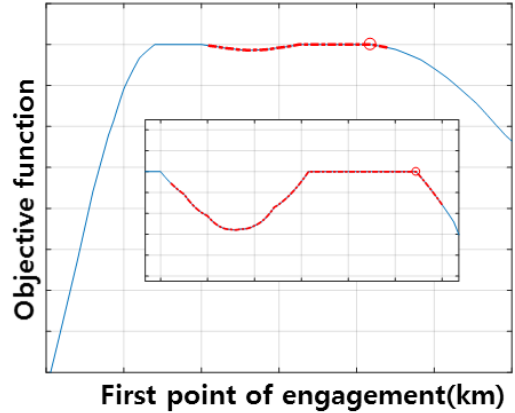


Fig. 11. Objective function, optimal point within feasible solutions when target is high speed and kill-assessment is T

표적이 저속에서 명중평가 시간이 10배 증가될 경우, 거리별 첫 번째 교전 요격 확률과 거리별 두 번째 교전 요격 확률은 Fig. 12와 같다. 명중평가 시간이 길어짐에 따라 β 가 $\beta > R_{s2} - R_{s1}$ 만큼 커졌고 목적 함수는 컨벡스 문제에서 다수의 지역해가 존재하는 비컨벡스 문제로 정식화되었다.

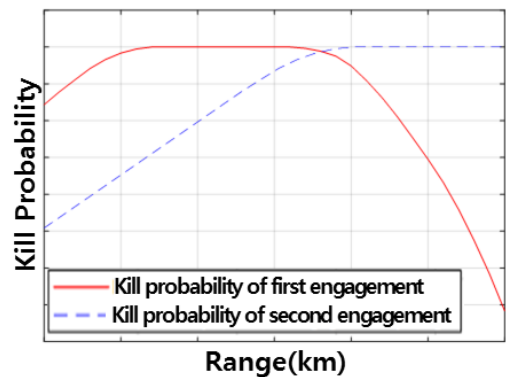


Fig. 12. Kill probability the first and second engagement by range when target is low speed and kill-assessment is $10 \cdot T$

Fig. 13은 표적이 저속이고 명중평가 시간이 $10 \times T$ 일 때 첫 번째 교전 거리에 따른 목적 함수인데, 앞선 설명한 바와 같이 목적 함수가 오목 함수가 아님을 확인하였다. Interior-Point 알고리즘을 통해 수렴 해를 산출하였고, 최적의 해임을 확인하였다. Interior-Point 알고리즘이 효과적으로 동작함을 확인하였다.

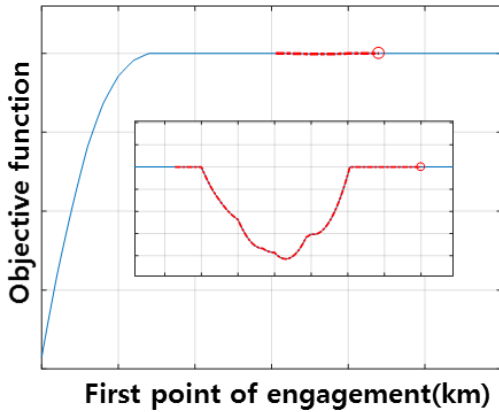


Fig. 13. Objective function, optimal point within feasible solutions when target is low speed and kill-assessment is $10 \times T$

6. 결론

본 논문에서는 교전 거리 및 표적 속도에 따라 변화하는 요격 확률 모델을 기반으로 함정 대공방어유도탄이 Shoot-Look-Shoot 교전 시 대함유도탄 요격 확률을 최대화하는 문제를 정식화하고 이에 대한 특성을 고찰하였다. 일반적으로 단일 요격 확률은 오목 함수의 형태지만 Shoot-Look-Shoot의 요격 확률 극대화 문제는 항상 오목 함수를 보장할 수 없다. 하지만 문제의 특성을 분석한 결과, 표적이 느리거나 명중평가 시간이 짧을 경우, 오목 함수의 특성을 만족하고 최적해의 전역성이 보장되는 비선형 컨벡스 최적화 문제로 간주된다. 반대로 표적이 빠르거나 명중평가 시간이 긴 경우, 목적 함수는 오목 함수의 특성을 만족하지 못하는 비선형 비컨벡스 최적화 문제로 간주된다. Shoot-Look-Shoot 교전의 요격 확률 극대화 문제의 최적 해를 도출하기 위해서 비선형 컨벡스 최적화 문제뿐만 아니라 비선형 비컨벡스 최적화 문제에서도 효과적인 Interior-Point 알고리즘을 사용하였으며, 표적

속도와 명중평가 시간에 따라 수치 시뮬레이션을 수행하여 이론적 결과가 타당함을 검증하였다.

기존 연구에서 대함유도탄 요격 확률 모델을 지나치게 단순화하여 간과되었던 표적에 따른 요격 확률의 변화와 교전 환경이 너무 복잡하여 정립할 수 없었던 교전간의 상관관계를 본 연구에서는 교전 거리와 표적 속도에 따라 변화하는 요격 확률 모델을 토대로 Shoot-Look-Shoot 요격 확률 최대화 문제를 정식화하고 수치적으로 분석하였으며, 대공방어유도탄의 최적 운용 산출에 효과적임을 검증하였다. 본 연구에서는 대함유도탄이 등속운동을 한다는 가정 하에 Shoot-Look-Shoot의 최적 운용을 산출하였지만, 기동 표적에 대해 변화하는 요격 확률을 분석하고 최적 운용을 산출하는 연구와 이러한 연구들을 토대로 다중표적에 대해 최적화하는 방안에 대해 연구가 향후 수행되어야 할 것이다.

References

- [1] Dowan Kim, Joongsup Yun, Chang-Kyung Ryoo, "Defense Strategy against Multiple Anti-Ship Missiles using Anti-Air Missiles," Journal of the Korean Society for Aeronautical&Space Sciences 39(4), pp. 354-361, 2011.
- [2] Jae Ick Kim, Young Ran Jung, Hyun Sil Kim, Cheol Ho Kim, Chan Woo Yu, "A Study on the Defense Effectiveness of Surface Ships against Diverse Anti-Surface Missile Attack Strategies," Journal of Systems Engineering Vol. 6, No. 1, pp. 33-39, 2011.
- [3] Woo Rim Jang, Kuk Kwon Park, Chang-Kyung Ryoo, "Medium/Short Hard-kill Anti-Air Defense Strategy for Warship Against Multiple Anti-Ship Missiles," KSAS 2016 Fall Conference, pp. 932-933, 2016.
- [4] JeongHoon Kim, ChangBeom Choi, Il-Chul Moon, TagGon Kim, "Battle Experiments via Interoperating the Mission and the Engagement Simulation Models: a Case Study of Fleet Anti-Air Defense's Effectiveness Analysis," KIMST Annual Conference Proceedings, pp. 2022-2025, 2010.
- [5] W. J. Bradford, "The Theoretical Layered Air-Defence Capability of a Ship Engaged Against Multiple

- Anti-Ship Capable Missile Attacks,” Guided Weapons Technical Memorandum, Defense Science and Technology Organization, Australia, pp. 3-10, 1992.
- [6] Tamir Eshel, “How Serious is the P800 Yakhont Threat? Does it have a Destabilizing Effect on the Middle East?,” Defense Update, 2010.
- [7] K. Glazebrook and A. Washburn, “Shoot-Look-Shoot: A Review and Extension,” Operations Research, Vol. 52, No. 3, pp. 454-463, 2004.
- [8] James Renegar, “A Mathematical View of Interior-Point Methods in Convex Optimization,” SIAM, USA, pp. 21-64, 2001.
- [9] R. J. Vanderbei and D. F. Shanno, “An Interior Point Algorithm for Nonconvex Nonlinear Programming,” Computational Optimization and Applications, pp. 231-252, 1999.