

다수 표적 연속교전 상황에서의 최적 발사각 Sequence 결정 개념 연구

류선미[†]

Study on a Noble Methodology for the Automatic Decision of Optimal Launch Angle Sequence under Multi-Target Engagement

Sunmee Ryu[†]

ABSTRACT

To engage multiple missiles in single launcher against multiple targets, launcher system has to operate for optimized launch angle to each target sequentially. If the launch angle sequence is simply defined according to the target assignment order only, overall engagement time would be increased, and even in some engagement scenarios, it could be possible to miss some moving targets being out of proper engagement area. Therefore, the study on methodology for a real-time decision of optimized launch angle sequence is necessary. In this paper, the automatic decision model of launch angle sequence was suggested to minimize total engagement time by analyzing the simulation results of all engagement sequence set for multiple moving target scenario. Performance of proposed methodology for decision of optimal launch angle sequence was verified by comparing with the optimal or suboptimal sequence obtained from simulation results.

Keywords : Guided Weapon System, Optimal Launch Angle Sequence, Multi-Target Engagement, Engagement Sequence Modeling, Simulation

요약

단일 발사대에 탑재된 다수의 유도탄이 다수의 표적과 순차적으로 교전하는 상황에서 발사대는 유도탄이 해당 표적을 타격할 수 있도록 적절한 발사각을 설정하여 구동하게 된다. 이 때, 개별 표적에 대해 할당된 순서대로 교전을 수행하게 되면 전체 교전 시간이 길어지며, 이동하는 표적이 교전 가능 영역을 벗어나게 되어 부분적으로 교전에 실패할 가능성이 있다. 따라서 다양한 표적 배치 상황에서 최적 교전을 수행할 수 있는 발사각 시퀀스(Sequence)에 대한 연구가 필수적이다. 본 연구에서는 다수의 이동하는 표적이 있는 전장 시나리오에서 시물레이션을 통해 모든 발사각 시퀀스에 대한 결과를 계산하고, 이 중 전체 교전 시간을 최소화 하는 최적의 발사각 시퀀스를 추출하는 과정을 통해 표적 시나리오에 따른 시퀀스 결정 논리를 모델링하였다. 그리고 그 모델링 결과를 통해 나온 교전 시퀀스와 시물레이션을 통해 획득한 최적 혹은 준최적 발사각 시퀀스를 비교함으로써 본 연구에서 제안한 최적 발사각 시퀀스 결정 개념을 검증하였다.

주요어: 유도무기체계, 최적 발사각 시퀀스, 다대다 교전, 교전 시퀀스 모델링, 시물레이션

1. 서론

다수의 표적에 다수의 무기체계가 대응하는 다대다 교전 상황에서는 교전 가능 영역 내에 표적이 식별되어 표적 정보를 획득하면 각 표적에 무기가 할당되고 교전 임무를 수행하는 일련의 과정이 반복된다. 특히, 다수의 고

Received: 10 August 2016, Revised: 22 September 2016,
Accepted: 22 September 2016

[†] Corresponding Author: Sunmee Ryu

E-mail: sunmeeryu@gmail.com

The 4th Missile Systems PMO, ADD, Daejeon, Korea

속 이동하는 표적에 대해 대응하는 유도무기 체계 운용 시, 유도무기 교전 가능 영역 내에서 최대한의 위협을 제거하기 위해 신속한 교전 능력이 요구된다. 이를 위해서는 비실시간의 운용자 판단이 개입되기 보다는 표적 배치 시나리오에 따라 자동으로 무기가 할당되는 자동화 시스템이 필요하다.

국내에서는 중거리 지대공 유도무기체계와 같이 다수의 무기체계 플랫폼에서 다수의 표적을 대응하는 시나리오의 연구가 주로 이루어지고 있으며(Kim et al., 2012), 국내외에서 표적의 능력치 및 의도를 분석하여 표적의 위협도를 평가하고 최적으로 무기를 할당하는 문제에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다(Dionne et al., 2008; Munkres, 1957; Paradis et al., 2005). 하지만 본 연구에서 고려하는 문제는 하나의 발사대에 탑재된 다수 유도무기 - 다수 표적에 대한 문제로 표적에 대한 동시 다발적인 공격이 불가능하며 신속한 순차적 교전이 요구된다. 따라서 발사대의 발사각 시퀀스(Sequence)에 따라 순차적으로 교전이 이루어지는데 개별 표적이 할당된 순서에 따라 교전을 진행하게 되면 교전 시간이 길어질 가능성이 있으며, 경우에 따라 표적이 교전 가능 영역을 벗어나 아군의 전력 혹은 보호해야 할 자산에 큰 피해를 주게 된다. 본 연구에서는 초기 위치와 속도에 따른 표적 배치 시나리오에 따라 가장 신속한 교전을 수행하기 위한 발사각 순서를 결정하여 유도무기를 할당하는 문제의 준최적해를 제시하였다.

무기의 할당 문제는 일반적인 자원 할당 혹은 Job 스케줄링(Hwang et al., 2010) 문제와 같이 표적 및 무기의 개수에 따라 해의 경우의 수가 크게 늘어나, 그 개수가 증가할수록 문제 해결을 위한 시간이 기하급수적으로 증가하는 Non-deterministic Polynomial time (NP)-Complete 문제로 알려져 있다(Lloyd et al., 1986). NP-Complete 문제는 근사적인 방법, 확률적인 방법, Heuristic Algorithm에 의한 방법 등으로 해를 구하는 연구가 진행되고 있다(Dasgupta et al., 2006). 무기를 할당하는 문제에 있어서도 Greedy Algorithm, Munkres Algorithm, 그리고 Genetic Algorithm 혹은 Dynamic Algorithm 등 다양한 방법의 Optimization Algorithm으로 문제를 해결하는 연구가 진행되고 있다(Jo et al., 2008; Kim et al., 2010; Roux et al., 2007). 최근 컴퓨터 연산 능력의 향상으로 인해 다량의 연산이 가능하게 되었지만 앞에서 언급했듯이 표적의 수가 늘어날 경우 방대한 양의 연산이 필요해 인공 지능적 방법을 활용한 풀이방법으로 무기체계에의 실시간 적용은 한계가 있다.

다수 표적에 대한 발사 시퀀스는 표적 개수의 증가에 따라 해의 경우의 수가 순열 개수만큼 증가하게 된다. 예를 들면, 3개의 표적이 있을 경우 무기가 할당되는 발사각 시퀀스가 6가지가 존재하지만, 10개의 표적이 있을 경우 3,628,800가지로 증가하게 된다. 본 논문에서는 해석적으로 해를 구하는 것이 불가능한 NP-Complete 문제를 모델링 및 시뮬레이션 과정을 통해 최적 혹은 준최적 해를 도출하기 위한 새로운 모델을 제시하였다.

본 논문의 2장에서는 다수의 이동 표적이 있는 전장 시나리오에서 발사각 시퀀스의 조합에 따른 전체 구동 발사각 및 교전 시간 계산 모델링 과정을 기술하였다. 3장에서는 다양한 시나리오에 대해 시뮬레이션을 수행하기 위해 자체 개발한 MATLAB 프로그램인 OLASeD (Optimal Launch Angle Sequence Decision) 프로그램의 구성을 보여주고, 이를 통해 전체 해집합을 찾아낸 결과와 교전 시간을 최소화 하는 최적 발사각 시퀀스 추출 결과를 기술하였다. 4장에서는 3장에서 분석한 결과를 토대로 최적 발사각 시퀀스 결정 모델을 제시하였고, 5장에서 그 모델의 최적성을 검증하였다.

2. 다수 표적 연속 교전 모델링

2.1 문제 정의

단일 발사대에 탑재된 유도무기체계가 N 개의 정지 혹은 이동하는 표적에 대응하는 시나리오의 개념도는 Figure 1과 같다.

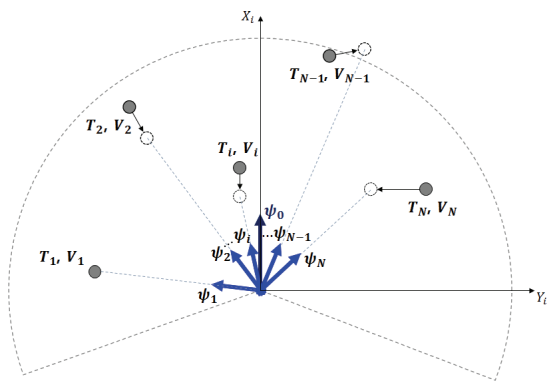


Fig. 1. N -Target engagement scenario

표적의 교전 순서에 따라 $i(1 \leq i \leq N)$ 번째 순서에 해당하는 표적이 T_i , 발사각이 ψ_i 로 각각 정의된다. 본 문제를 적용할 무기체계의 특성을 반영하여 유도무기의

속도(V_M)와 발사대 회전 각속도(ω_L)는 일정한 상수로 가정했으며, 문제의 간략화를 위해 유도무기의 종말유도 단계 부분을 생략하여 발사방향은 표적 조우 지점과 일치선이 된다고 가정한다. 표적의 속도가 유도탄의 속도에 비해 상대적으로 느린 무기체계에서는 이와 같은 가정이 탄착 성능의 평가에 큰 영향을 주지 않는 것으로 판단된다. 발사대 위치 중심의 2차원 XY축을 관성 좌표계로 선정하였다. 발사대 초기 지향각은 X축을 향하고 있다고 가정하며, 하나의 유도무기가 할당되어 교전을 할 경우 발사절차에 소요되는 시간(T_{FC})이 상수로 주어진다. 각 교전 시나리오에 따라 표적의 개수, 각 표적의 위치 및 속도 정보가 주어지며 표적은 변침하지 않는 표적, 즉 가속도가 없는 표적으로 가정한다.

본 문제를 최적화하기 위한 Cost Function은 주어진 N 개의 표적에 대한 전체 교전 시간으로, 이를 최소화 하는 해를 도출해야 한다. i 번째 교전이 이루어지기까지의 교전시간 T_{E_i} 는 Equation (1)과 같이 표현된다.

$$T_{E_i} = T_{E_{i-1}} + T_{FC} + \frac{1}{\omega_L} |\psi_i - \psi_{i-1}| \quad (1)$$

여기서 $T_{E_{i-1}}$ 는 $i-1$ 번째 표적까지의 교전시간(단, T_{E_0} 는 0으로 가정), ψ_i 와 ψ_{i-1} 은 각각 i , $i-1$ 번째 표적에 대한 발사각이다.

첫 번째 및 두 번째 교전까지의 교전시간은 Equations (2)과 (3)과 같이 전개된다.

$$T_{E_1} = T_{FC} + \frac{1}{\omega_L} |\psi_1 - \psi_0| \quad (2)$$

$$T_{E_2} = 2T_{FC} + \frac{1}{\omega_L} (|\psi_1 - \psi_0| + |\psi_2 - \psi_1|) \quad (3)$$

따라서 N 번째 표적까지의 교전 시간 T_{E_N} 은 Equation (4)와 같이 표현되며, 본 연구에서 해결할 최적화 문제의 Cost Function이 된다.

$$T_{E_N} = NT_{FC} + \frac{1}{\omega_L} \sum_{i=1}^N |\psi_i - \psi_{i-1}| \quad (4)$$

2.2 교전 시간 계산 알고리즘

교전 시작 시점에서 N 개의 표적은 각각 다른 위치와 속도를 가지며 표적의 초기 정보만으로 전체 교전 시퀀스를 결정하고자 한다. 따라서 i 번째 교전 시, 해당 표적과의 예상 조우 지점을 계산해서 이 지점으로 발사를 수행한다. 발사각은 예상 조우 지점의 위치에 의해 계산되지만 각 표적의 예상 조우 지점은 교전 순서에 따라 달라

지므로 정확한 조우 지점을 찾기 위해서는 일정 범위 이내로 수렴할 때까지 여러 차례의 iterations 과정을 거쳐야 한다. 하지만 많은 횟수로 예상 조우 지점 계산을 위한 iterations를 수행하게 되면 연산량이 늘어나므로 시뮬레이션을 통해 일정 횟수의 iterations 수행에 대한 수렴성을 확인하였다. 본 논문에서 다루는 교전 가능 영역 및 표적의 속도 범위 내에서는 2회의 iterations만으로도 예상 표적 조우 지점이 일정 범위 내로 수렴함을 2.3절에서 검증하였다.

i 번째 발사 순서에 할당된 표적 초기 정보로 $P_{T_i}(P_{Tx_i}, P_{Ty_i})$, $V_{T_i}(V_{Tx_i}, V_{Ty_i})$, i 번째 발사 시점에서의 해당 표적과의 예상 조우 지점을 $pP_{T_i}(pP_{Tx_i}, pP_{Ty_i})$ 라고 하면, 위의 결과를 이용하여 전체 교전 시간을 구하는 과정은 아래와 같다.

ITERATION ①

$$pP_{Tx_i} = P_{Tx_i}^{(0)} + V_{Tx_i} T_i \quad (5)$$

$$pP_{Ty_i} = P_{Ty_i}^{(0)} + V_{Ty_i} T_i \quad (6)$$

여기서, $P_{Tx_i}^{(0)}$, $P_{Ty_i}^{(0)}$ 는 i 번째 교전 시 해당 표적의 위치로, 아래와 같다.

$$P_{Tx_i}^{(0)} = P_{Tx_i} + V_{Tx_i} T_{E_{i-1}} \quad (7)$$

$$P_{Ty_i}^{(0)} = P_{Ty_i} + V_{Ty_i} T_{E_{i-1}} \quad (8)$$

T_i 는 교전 시작 이후 i 번째 표적이 타격될 때까지 걸리는 전체 시간으로, T_0 는 0으로 가정한다.

$$T_i = T_{E_{i-1}} + T_{FC} + T_{ROTi} + T_{F_i} \quad (9)$$

T_i 는 발사절차 소요시간 및 이전 교전까지의 소요시간, i 번째 표적과의 교전 시 비행시간인 T_{F_i} , 발사대 회전 시간인 T_{ROTi} 의 합으로 표현된다. 여기서 T_{F_i} 와 T_{ROTi} 는 다음과 같다.

$$T_{F_i} = \frac{R_{o_i}}{V_M} = \frac{\sqrt{(P_{Tx_i}^{(0)})^2 + (P_{Ty_i}^{(0)})^2}}{V_M} \quad (10)$$

$$T_{ROTi} = \frac{1}{\omega_L} \left| \tan^{-1} \left(\frac{P_{Ty_i}^{(0)}}{P_{Tx_i}^{(0)}} \right) - \psi_i \right| \quad (11)$$

따라서, 첫 번째 iteration을 통해 계산한 표적의 예상 조우 지점 $pP_{Tx_i}^{(1)}$, $pP_{Ty_i}^{(1)}$ 은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 pP_{T_{x_i}}^{(1)} &= P_{T_{x_i}} + V_{T_{x_i}} \left(T_{E_{i-1}} + T_{FC} \right. \\
 &\quad \left. + \frac{1}{\omega_L} \left| \tan^{-1} \left(\frac{P_{T_{y_i}}^{(0)}}{P_{T_{x_i}}^{(0)}} \right) - \psi_{i-1} \right| \right) \\
 &\quad \left(+ \frac{\sqrt{(P_{T_{x_i}}^{(0)})^2 + (P_{T_{y_i}}^{(0)})^2}}{V_M} \right)
 \end{aligned} \tag{12}$$

$$\begin{aligned}
 &= P_{T_{x_i}} + V_{T_{x_i}} T_{E_{i-1}} + V_{T_{x_i}} T_{FC} \\
 &\quad + \frac{V_{T_{x_i}}}{\omega_L} \left| \tan^{-1} \left(\frac{P_{T_{y_i}}^{(0)}}{P_{T_{x_i}}^{(0)}} \right) - \psi_{i-1} \right| \\
 &\quad + \frac{V_{T_{x_i}}}{V_M} \sqrt{(P_{T_{x_i}}^{(0)})^2 + (P_{T_{y_i}}^{(0)})^2}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 pP_{T_{y_i}}^{(1)} &= P_{T_{y_i}} + V_{T_{y_i}} \left(T_{E_{i-1}} + T_{FC} \right. \\
 &\quad \left. + \frac{1}{\omega_L} \left| \tan^{-1} \left(\frac{P_{T_{y_i}}^{(0)}}{P_{T_{x_i}}^{(0)}} \right) - \psi_{i-1} \right| \right) \\
 &\quad \left(+ \frac{\sqrt{(P_{T_{x_i}}^{(0)})^2 + (P_{T_{y_i}}^{(0)})^2}}{V_M} \right)
 \end{aligned} \tag{13}$$

$$\begin{aligned}
 &= P_{T_{y_i}} + V_{T_{y_i}} T_{E_{i-1}} + V_{T_{y_i}} T_{FC} \\
 &\quad + \frac{V_{T_{y_i}}}{\omega_L} \left| \tan^{-1} \left(\frac{P_{T_{y_i}}^{(0)}}{P_{T_{x_i}}^{(0)}} \right) - \psi_{i-1} \right| \\
 &\quad + \frac{V_{T_{y_i}}}{V_M} \sqrt{(P_{T_{x_i}}^{(0)})^2 + (P_{T_{y_i}}^{(0)})^2}
 \end{aligned}$$

ITERATION ②

ITERATION ①에서 계산한 $pP_{T_i}^{(1)}(pP_{T_{x_i}}^{(1)}, pP_{T_{y_i}}^{(1)})$ 를 향해 발사가 이루어진다고 가정하면, 최종 근사적인 T_i 및 $pP_{T_{x_i}}, pP_{T_{y_i}}$ 는 아래와 같이 업데이트 된다.

$$\begin{aligned}
 T_i &= T_{E_{i-1}} + T_{FC} \\
 &\quad + \frac{1}{\omega_L} \left| \tan^{-1} \left(\frac{pP_{T_{y_i}}^{(1)}}{pP_{T_{x_i}}^{(1)}} \right) - \psi_{i-1} \right| \\
 &\quad + \frac{\sqrt{(pP_{T_{x_i}}^{(1)})^2 + (pP_{T_{y_i}}^{(1)})^2}}{V_M}
 \end{aligned} \tag{14}$$

$$\begin{aligned}
 pP_{T_{x_i}} &= P_{T_{x_i}} + V_{T_{x_i}} \left(T_{E_{i-1}} + T_{FC} \right. \\
 &\quad \left. + \frac{1}{\omega_L} \left| \tan^{-1} \left(\frac{pP_{T_{y_i}}^{(1)}}{pP_{T_{x_i}}^{(1)}} \right) - \psi_{i-1} \right| \right) \\
 &\quad \left(+ \frac{\sqrt{(pP_{T_{x_i}}^{(1)})^2 + (pP_{T_{y_i}}^{(1)})^2}}{V_M} \right)
 \end{aligned} \tag{15}$$

$$\begin{aligned}
 pP_{T_{y_i}} &= P_{T_{y_i}} + V_{T_{y_i}} \left(T_{E_{i-1}} + T_{FC} \right. \\
 &\quad \left. + \frac{1}{\omega_L} \left| \tan^{-1} \left(\frac{pP_{T_{y_i}}^{(1)}}{pP_{T_{x_i}}^{(1)}} \right) - \psi_{i-1} \right| \right) \\
 &\quad \left(+ \frac{\sqrt{(pP_{T_{x_i}}^{(1)})^2 + (pP_{T_{y_i}}^{(1)})^2}}{V_M} \right)
 \end{aligned} \tag{16}$$

i 번째 발사시점의 발사각 ψ_i 는 Equation 17과 같이 계산되며,

$$\psi_i = \tan^{-1} \left(\frac{pP_{T_{y_i}}}{pP_{T_{x_i}}} \right) \tag{17}$$

전체 교전 시간인 T_{E_N} 은 Equation 18과 같이 구할 수 있다.

$$T_{E_N} = NT_{FC} + \frac{1}{\omega_L} \sum_{i=1}^N |\psi_i - \psi_{i-1}| \tag{18}$$

따라서 전체 교전 시간은 각 표적들이 할당되는 순서와 표적들의 초기 상태인 위치 및 속도에 의해서 모델링될 수 있음을 보였다.

2.3 교전 모델 수렴성 확인

앞서 언급한 바와 같이, 전체 구동 발사각 및 교전 시간을 계산하기 위해서는 각 발사 시퀀스에 따른 표적의 예상 조우 지점을 구해야 한다. 본 논문에서는 전체 교전 시간 모델의 단순화를 위해 이 과정을 2회의 iterations만으로 간략화 했으며, 그 수렴성을 확인하고자 시뮬레이션을 수행하였다. 다수의 이동 표적이 있는 다양한 시나리오를 가정하기 위해 근거리 고속 이동 표적 시나리오, 원거리 고속 이동 표적 시나리오, 임의 표적배치 시나리오(전 사거리 고속/저속 이동표적)를 정의하였다.

시나리오 1. 근거리 고속이동 표적

5개의 표적이 발사대로부터 10km 이내의 근거리에서 위치하며 고속으로 이동하고 있는 표적 시나리오 1(Figure 2)에 대한 전체 교전 시간 계산 결과는 Figure 3과 같다. Figure 3의 위쪽 그래프는 수렴할 때까지 iterations를 수행한 결과, 아래쪽 그래프는 2.2절에서 제시한 단순 모델로 계산한 결과로 전체 시퀀스에 대해 총 교전 시간 계산 결과가 1~2초 이내의 차이로 수렴하였다.

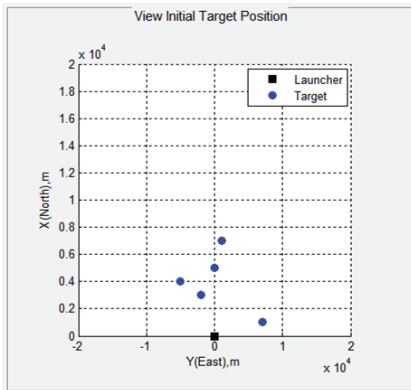


Fig. 2. Scenario 1

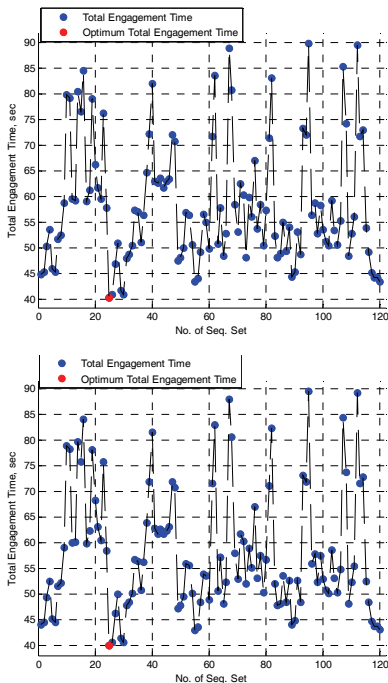


Fig. 3. Total engagement time of sequence set(Scenario 1)
(Upper : Iteration calculation, Lower : Simple model)

시나리오 2. 원거리 고속이동 표적

5개의 표적이 발사대로부터 10km 이상의 원거리에서 위치하며 고속으로 이동하고 있는 표적 시나리오 2(Figure 4)에 대한 전체 교전 시간 계산 결과는 Figure 5와 같다. 이 결과 역시 전 Sequence Set에 대해 두 가지 계산 방법의 결과가 유사하였다.

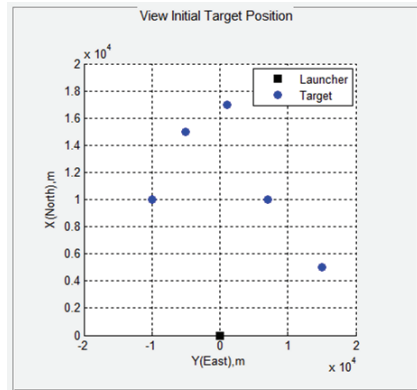


Fig. 4. Scenario 2

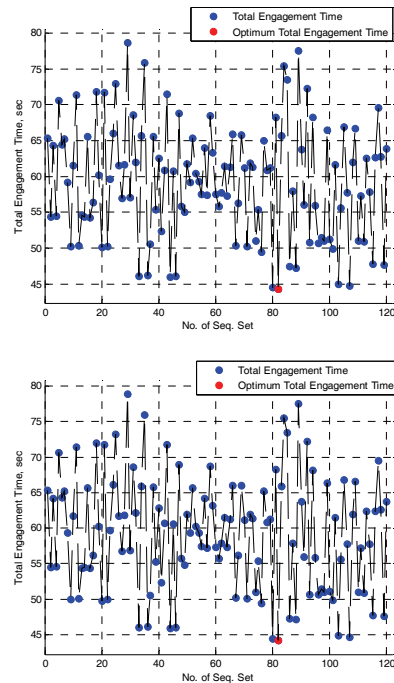


Fig. 5. Total engagement time of sequence set(Scenario 2)
(Upper : Iteration calculation, Lower : Simple model)

시나리오 3. 임의 표적배치 시나리오

5개의 표적이 발사대로부터 전 사거리 영역에 위치하며 다양한 속도로 이동하고 있는 표적 시나리오 3(Figure 6)에 대한 전체 교전 시간 계산 결과는 Figure 7과 같다. 이 결과 역시 전 Sequence Set에 대해 유사한 결과를 도출하였다.

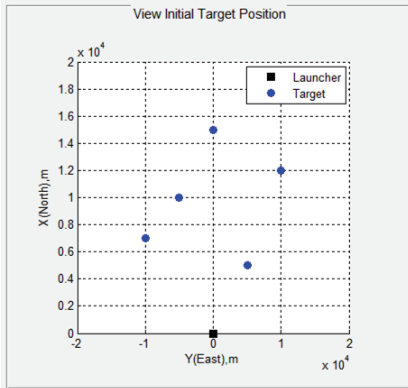


Fig. 6. Scenario 3

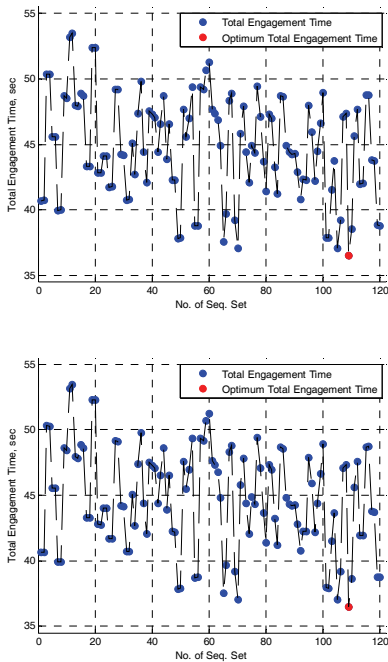


Fig. 7. Total engagement time of sequence set(Scenario 3)
(Upper : Iteration calculation, Lower : Simple model)

3. 시뮬레이션 프로그램 및 결과

3.1 시뮬레이션 프로그램

2장에서 모델링한 다수 표적 연속 교전 모델에 대한 MATLAB 시뮬레이션 프로그램인 OLASeD를 자체 개발하여 본 연구에 활용하였다. OLASeD 프로그램은 표적 정보를 입력하는 부분, 표적 배치 시나리오에 따라 모든 발사각 Sequence Set에 대한 교전 시간 및 발사각 회전 각도를 계산하는 부분, 전체 교전 시간 관점의 최적 발사각 시퀀스를 결정하여 결과를 도출하는 부분, 사용자가 지정한 시퀀스에 대한 결과를 도출하는 부분으로 구성되어 있다. 프로그램의 입/출력 인터페이스는 Figure 8과 같이 MATLAB GUI로 구축하여 사용자가 쉽게 사용할 수 있도록 구현하였다.

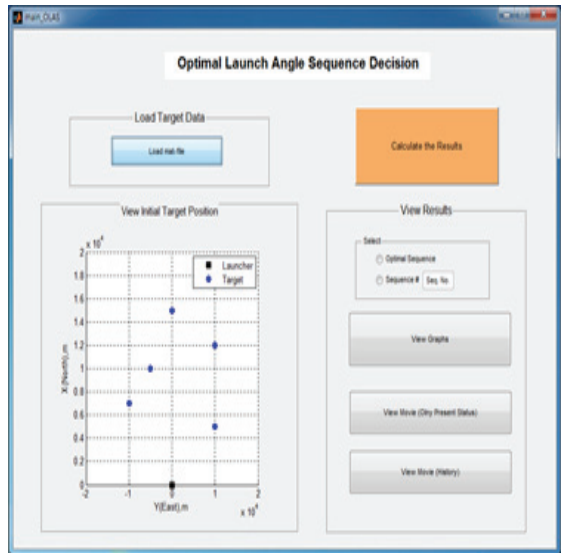


Fig. 8. OLASeD program GUI

OLASeD 프로그램의 결과로는 Figures 3, 5, 7에 보이는 전체 Sequence Set에 대한 전체 교전 시간 그래프와 최적 발사각 시퀀스 선택 결과, 그리고 그 결과를 텍스트로 보여주는 Figure 9의 결과창, Figure 10의 결과 그래프 및 실시간 영상이 출력되도록 구성하였다.

해당 프로그램은 주어진 표적 배치 상황에 대한 최적의 교전 순서를 제시해 줄 뿐 아니라 본 연구에서 제안한 모델의 결과를 최적의 결과와 비교해 주어 새로운 모델을 수립하고 검증하는데 용이하게 사용되었다.

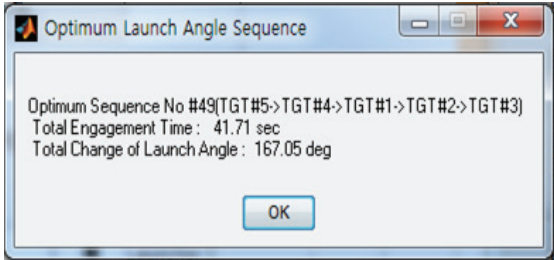


Fig. 9. Result window of OLASeD

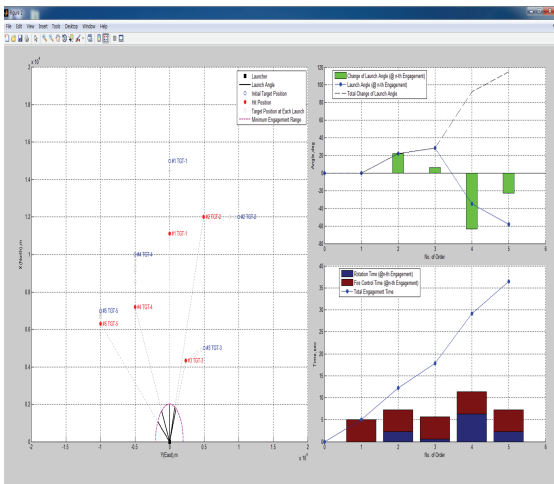


Fig. 10. Result graph of OLASeD

3.2 시뮬레이션 결과

2장에서 제시한 다수 표적 연속 교전 모델을 이용하여 모든 해집합에 대한 전체 교전 시간을 계산하는 시뮬레이션을 수행하였다. 해집합은 N 개의 표적에 대해 나열하는 순열로, $N!$ 의 개수가 존재하며 MATLAB 프로그램을 활용해 계산하였다. 본 논문에서 대표적으로 제시한 시나리오는 5개의 표적에 대한 시나리오로 전체 Sequence Set에 대한 연산 시간은 0.01초 이내로 짧지만, 표적의 개수가 10개 이상으로 늘어날 경우 동일한 연산 능력의 프로세서에서 전체 교전 시간 계산에만 약 315,000배 이상이 소요된다. 각 시나리오에서 전체 해집합 중 최적 발사각 시퀀스는 다음과 같이 결정된다.

시나리오 1. 근거리 고속이동 표적

근거리 고속 이동표적이 배치된 시나리오 1의 표적 정보는 Table 1과 같다. 시나리오 1에 대한 전체 발사 Sequence Set의 교전 시간을 계산해 보면 Figure 3과 같다. 전체 교전 시간을 최소화 하는 최적의 발사각 시퀀스는

Table 1. Target data of scenario 1

Target No.	Position		Velocity	
	X [m]	Y [m]	V_X [m/s]	V_Y [m/s]
1	7000	1000	-100	0
2	1000	7000	0	-100
3	5000	0	-80	0
4	4000	-5000	0	50
5	3000	-2000	-50	0

$$[TGT\#5 \rightarrow TGT\#4 \rightarrow TGT\#3 \rightarrow TGT\#1 \rightarrow TGT\#2]$$

의 순으로 교전하는 것으로, 전체 교전에 40.13초가 소요되며 발사대 구동 각도는 151.28°가 된다.

시뮬레이션 결과 중 전체 교전 시간의 관점에서 최적 발사각 시퀀스와 큰 차이를 보이지 않는 준최적 결과를 추출하면 Table 2와 같다.

Table 2. Optimal and sub-optimal results of scenario 1

Launch Sequence	Total Eng. Time [sec]	Total Launch Angle [deg]
TGT#5→TGT#4→TGT#3→TGT#1→TGT#2	40.13	151.3
TGT#4→TGT#5→TGT#3→TGT#1→TGT#2	40.72	157.2
TGT#3→TGT#4→TGT#5→TGT#1→TGT#2	41.44	164.4
TGT#3→TGT#5→TGT#4→TGT#1→TGT#2	40.76	157.6

시나리오 2. 원거리 고속이동 표적

원거리 고속 이동표적이 배치된 시나리오 2의 표적 정보는 Table 3과 같다.

Table 3. Target data of scenario 2

Target No.	Position		Velocity	
	X [m]	Y [m]	V_X [m/s]	V_Y [m/s]
1	15000	-5000	-100	0
2	17000	1000	0	100
3	5000	15000	0	-70
4	10000	-10000	-80	-50
5	10000	7000	-100	0

시나리오 2에 대한 전체 발사 Sequence Set의 교전 시간을 계산해 보면 Figure 5와 같다. 전체 교전 시간을 최소화 하는 최적의 발사각 시퀀스는

$$[TGT\#4 \rightarrow TGT\#1 \rightarrow TGT\#2 \rightarrow TGT\#5 \rightarrow TGT\#3]$$

의 순으로 교전하는 것으로, 전체 교전에 44.25초가 소요되며 발사대 구동 각도는 192.48°가 된다.

시뮬레이션 결과 중 전체 교전 시간의 관점에서 최적 발사각 시퀀스와 큰 차이를 보이지 않는 준최적 결과를 보면 Table 4와 같다.

Table 4. Optimal and sub-optimal results of scenario 2

Launch Sequence	Total Eng. Time [sec]	Total Launch Angle [deg]
TGT#4→TGT#1→TGT#2→TGT#3→TGT#5	44.49	194.9
TGT#4→TGT#1→TGT#2→TGT#5→TGT#3	44.25	192.5
TGT#1→TGT#4→TGT#2→TGT#3→TGT#5	44.94	199.4
TGT#1→TGT#4→TGT#2→TGT#5→TGT#3	44.67	196.7

시나리오 3. 임의 표적배치 시나리오

임의 위치, 임의 속도 이동표적을 배치한 시나리오 3의 표적 정보는 Table 5와 같다.

Table 5. Target data of scenario 3

Target No.	Position		Velocity	
	X [m]	Y [m]	V _X [m/s]	V _Y [m/s]
1	15000	0	-100	0
2	12000	10000	0	-100
3	5000	5000	-20	-80
4	10000	-5000	-50	0
5	7000	-10000	-10	0

시나리오 3에 대한 전체 발사 Sequence Set의 교전 시간을 계산해 보면 Figure 7과 같다. 전체 교전 시간을 최소화 하는 최적의 발사각 시퀀스는

$$[TGT\#1 \rightarrow TGT\#2 \rightarrow TGT\#3 \rightarrow TGT\#4 \rightarrow TGT\#5]$$

의 순으로 교전하는 것으로, 전체 교전에 36.51초가 소요되며 발사대 구동 각도는 115.06°가 된다.

시뮬레이션 결과 중 전체 교전 시간의 관점에서 최적 발사각 시퀀스와 큰 차이를 보이지 않는 준최적 결과를 보면 Table 6과 같다.

Table 6. Optimal and sub-optimal results of scenario 3

Launch Sequence	Total Eng. Time [sec]	Total Launch Angle [deg]
TGT#5→TGT#4→TGT#1→TGT#2→TGT#3	37.86	128.6
TGT#4→TGT#5→TGT#1→TGT#2→TGT#3	37.90	129.0

TGT#3→TGT#2→TGT#1→TGT#4→TGT#5	37.56	125.6
TGT#2→TGT#3→TGT#1→TGT#4→TGT#5	37.06	120.6
TGT#1→TGT#4→TGT#5→TGT#2→TGT#3	37.94	129.4
TGT#1→TGT#5→TGT#4→TGT#2→TGT#3	37.90	129.0
TGT#1→TGT#3→TGT#2→TGT#4→TGT#5	37.05	120.5
TGT#1→TGT#2→TGT#3→TGT#4→TGT#5	36.51	115.1

4. 최적 발사각 시퀀스 결정 모델

4.1 시뮬레이션 결과 분석

3장에서 수행한 시뮬레이션 결과를 보면 전체 교전 시간 관점의 최적 발사각 시퀀스 결과와 이와 유사한 수준의 교전 시퀀스 결과를 도출할 수 있다. 각 시퀀스 별로 전체 교전 시간이 1~2초 이내의 차이를 보이며 이 시간은 전체 교전에 결정적인 영향을 미치지 않는 수준으로 판단된다. 따라서 Table 2와 4, 6에 각각 작성된 발사각 시퀀스는 최적 혹은 준최적 결과로, 이를 분석하여 최적 발사각 시퀀스 결정 모델을 수립하였다.

최적 발사각 시퀀스에 따른 시나리오 1의 결과는 Figure 11과 같으며, Figures 12와 13에 발사각 변화 및 교전 시간을 도시했다. Target #5를 향해 첫 번째 발사각을 설정하고 가까운 발사각 순서대로 발사각 구동을 한 것을 확인할 수 있다.

최적 발사각 시퀀스에 따른 시나리오 2의 결과는 Figure 14와 같으며, Figures 15와 16에 발사각 변화 및 교전 시간을 도시했다. 시나리오 3의 최적 발사각 시퀀스 또한 Figures 17과 18, 19에서 확인할 수 있다.

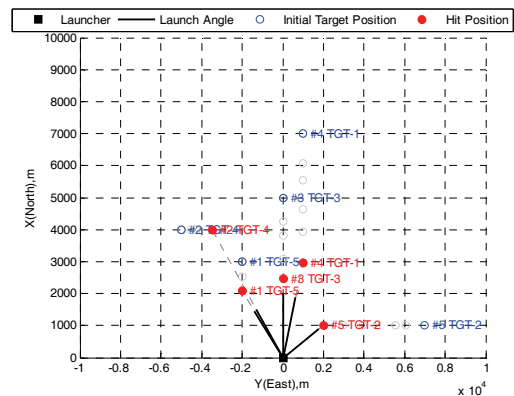


Fig. 11. Optimal engagement result (Scenario 1)

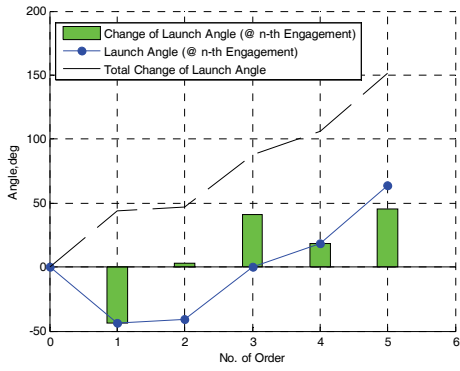


Fig. 12. Optimal result of launch angle (Scenario 1)

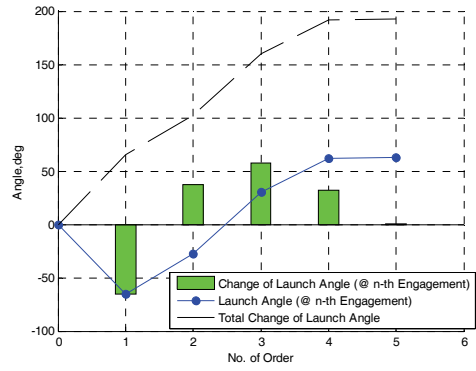


Fig. 15. Optimal result of launch angle (Scenario 2)

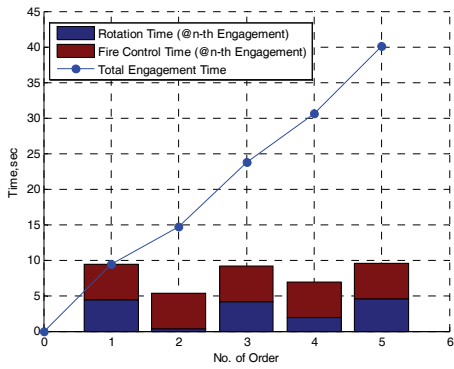


Fig. 13. Optimal result of engagement time (Scenario 1)

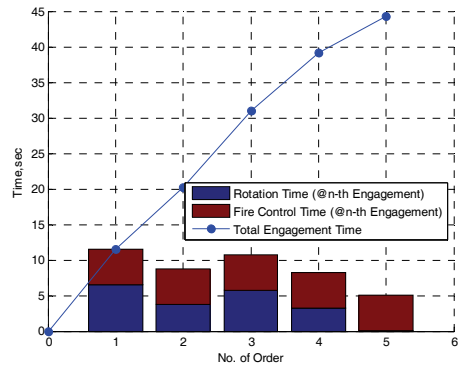


Fig. 16. Optimal result of engagement time (Scenario 2)

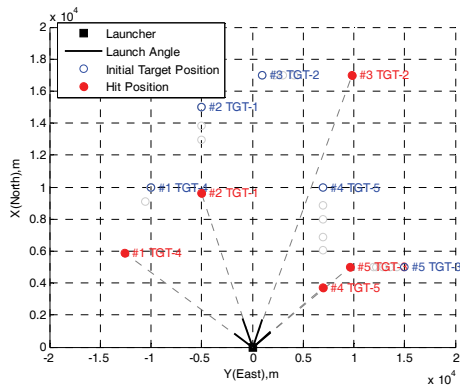


Fig. 14. Optimal engagement result (Scenario 2)

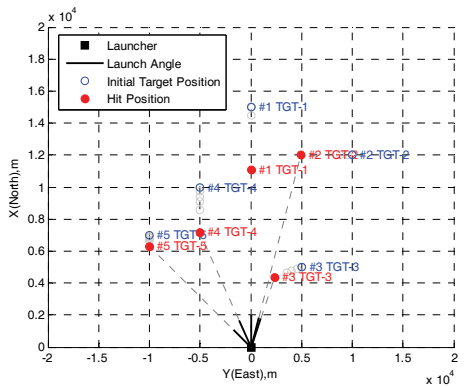


Fig. 17. Optimal engagement result (Scenario 3)

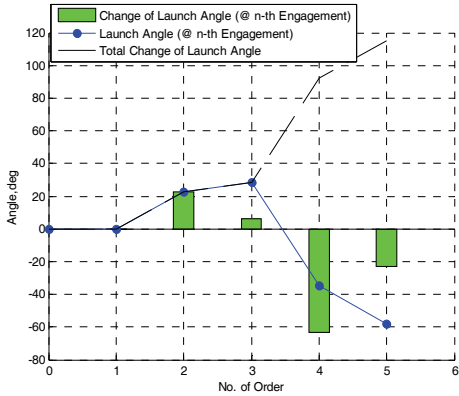


Fig. 18. Optimal result of launch angle (Scenario 3)

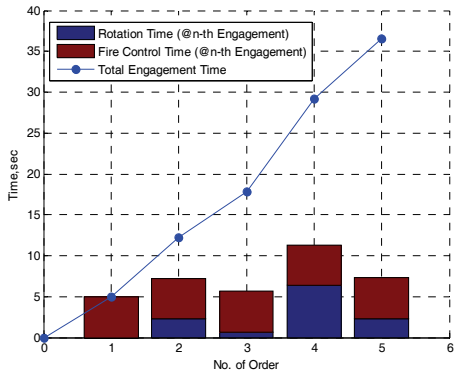


Fig. 19. Optimal result of engagement time (Scenario 3)

4.2 최적 발사각 시퀀스 결정 모델

발사각을 결정하는 표적의 위치는 초기 위치가 아니라 유도무기와 표적이 조우할 시점의 표적 위치로 결정된다. 발사각을 계산하기 위한 예상 표적 조우 위치가 발사되는 순서에 따라 다르게 계산된다는 것은 2.2절에서 이미 보였으나, 그 결과는 교전 순서가 이미 정해져 있다는 가정 하에 풀이가 진행되므로 그대로 적용할 수 없었다. 따라서 여기서는 교전 순서가 정해지지 않은 상태에서 초기 표적의 위치와 속도만을 활용하여 발사대 회전각, 발사절차 소요시간, 그리고 비행시간을 고려한 예상 표적 조우 위치를 계산하였다.

3장의 시뮬레이션 결과를 분석하면, 예상 표적 조우 위치를 적용해서 계산되는 발사각의 크기가 큰 값에서 작은 값 혹은 작은 값에서 큰 값의 순으로 발사각 시퀀스가 결정 될 경우 전체 교전 시간이 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 또한 이동하는 표적이므로, 교전 시간이 흐름에

따라 더 큰 크기의 발사각을 요구하는 표적이 우선적으로 할당되어 전체 구동 발사각의 합을 최소화 하는 것이 효율적인 것으로 분석되었다. 마지막으로 초기 발사각을 기준으로 예상 표적 조우 위치가 더 적은 크기의 발사각을 요구하는 방향(+ 혹은 - 방향)으로 먼저 구동하는 것이 최적의 해에 근접함을 알 수 있었다. 최적 발사각 시퀀스 결정 논리를 정리하면 다음과 같다.

- ① 예상 표적 조우 지점으로부터 각 표적에 대한 발사각 계산
- ② 발사각 크기 별 오름차순 정렬
- ③ 최대/최소 발사각 크기가 요구되는 표적의 시간에 따른 요구 발사각 변화를 계산하여 변화율이 양의 값을 갖는 방향으로 우선 구동
- ④ ③에서 제시한 논리로 초기 구동 방향을 결정할 수 없을 때, 최대/최소 구동 요구 발사각의 절대값이 작은 방향으로 우선 구동

5. 결과 비교 및 모델 검증

시나리오 1. 근거리 고속이동 표적

시나리오 1에 제안한 최적 발사각 시퀀스 결정 모델을 적용하면 다음과 같다.

- (1) 예상 표적 조우 지점 및 발사각

예상 표적 조우 지점과 그에 따른 발사각을 구하면 Table 7과 같다.

Table 7. Expected hit position and launch angle (Scenario 1)

Target No.	Expected Hit Position		Launch Angle [deg]
	X [m]	Y [m]	
1	4339	1000	12.98
2	1000	3602	74.48
3	3424	0	0
4	4000	-4065	-45.46
5	2388	-2000	-39.94

- (2) 발사각 크기 별 정렬

각 표적에 요구되는 발사각 크기 별로 오름차순으로 정렬하면, 발사각 시퀀스는 Table 8과 같다.

Table 8. Launch angle sequence

[TGT#4→TGT#5→TGT#3→TGT#1→TGT#2]

(3) 최적 발사각 시퀀스 결정

위에서 제안한 논리에 따라 최종적으로 최적 발사각 시퀀스를 결정하면 Table 9와 같다.

Table. 9. Launch angle sequence

[TGT#4→TGT#5→TGT#3→TGT#1→TGT#2]

이 결과는 시나리오 1의 준최적 결과로 제시된 Table 2에 포함된 시퀀스이다. 전체 교전 시간이 40.72초로 최적 시퀀스의 전체 교전 시간 40.13초에 매우 근접한 결과를 도출하였다.

(4) 최적 발사각 시퀀스 시뮬레이션 결과

Table 9에 제시된 시나리오 1의 최적 발사각 시퀀스로 교전을 수행하면 Figure 20과 같은 결과가 도출되었다. 예상 표적 조우 지점이 실제 조우 위치와 정확히 일치하지는 않지만 이를 활용한 시퀀스 결정 논리가 전체 교전 시간 최소화 관점의 준최적 결과를 보이는 것을 확인했다. 해당 시퀀스로 교전 시, 구동 발사각 및 전체 발사각은 Figure 21과 같이 변화하며 각 단계의 발사대 구동 시간 및 전체 교전 시간은 Figure 22와 같다.

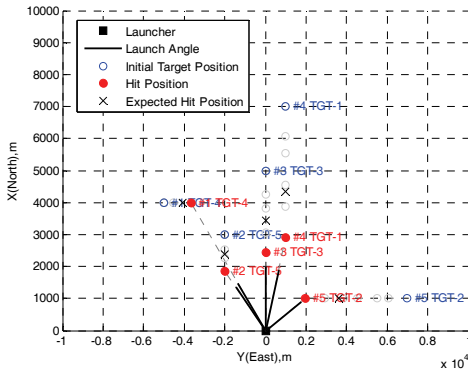


Fig. 20. Engagement result (Scenario 1)

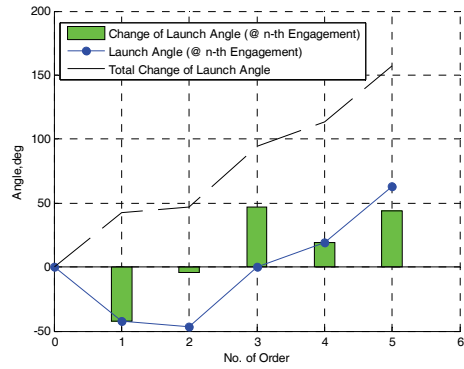


Fig. 21. Result graph of launch angle (Scenario 1)

시나리오 2. 원거리 고속이동 표적

시나리오 2에 최적 발사각 시퀀스 결정 모델을 적용하면 다음과 같다.

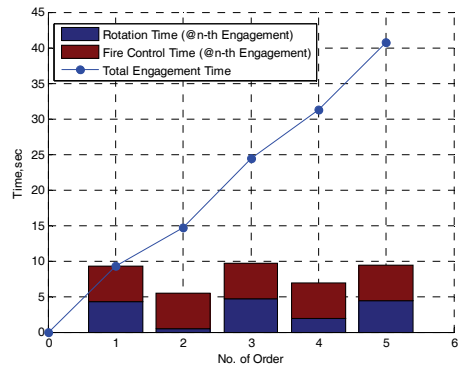


Fig. 22. Result graph of engagement time (Scenario 1)

(1) 예상 표적 조우 지점 및 발사각

예상 표적 조우 지점과 그에 따른 발사각을 구하면 Table 10과 같다.

Table. 10. Expected hit position and launch angle (Scenario 2)

Target No.	Expected Hit Position		Launch Angle [deg]
	X [m]	Y [m]	
1	10034	-5000	-26.49
2	17000	6542	21.05
3	5000	10894	65.35
4	6632	-12105	-61.28
5	5560	7000	51.54

(2) 발사각 크기 별 정렬

각 표적에 요구되는 발사각 크기 별로 오름차순으로 정렬하면, 발사각 시퀀스는 Table 11과 같다.

Table 11. Launch angle sequence (Scenario 2)

[TGT#4→TGT#1→TGT#2→TGT#5→TGT#3]

(3) 최적 발사각 시퀀스 결정

제한한 논리에 따라 최종적으로 최적 발사각 시퀀스를 결정하면 Table 12와 같다.

이 결과는 시나리오 2의 최적 발사각 시퀀스 결과와 동일하다.

Table 12. Launch angle sequence (Scenario 2)

[TGT#4→TGT#1→TGT#2→TGT#5→TGT#3]

(4) 최적 발사각 시퀀스 시뮬레이션 결과

Table 12에 제시된 시나리오 2의 최적 발사각 시퀀스로 교전을 수행하면 Figure 23과 같은 결과를 도출하였다. 본 연구에서 제안한 발사각 시퀀스 결정 논리가 전체 교전 시간 최소화 관점에서 최적 결과와 일치하는 것을 확인했다. 해당 시퀀스로 교전 시, 구동 발사각 및 전체 발사각은 Figure 15와 같이 변화하며 각 단계의 발사대 구동 시간 및 전체 교전 시간은 Figure 16과 같다.

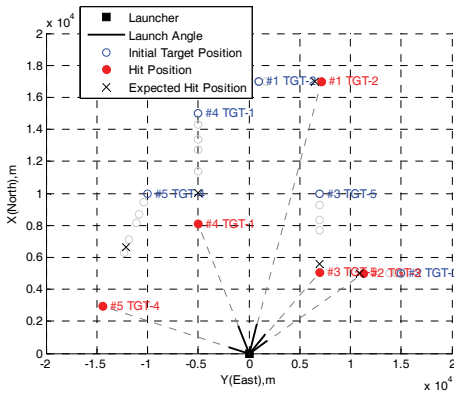


Fig. 23. Engagement result (Scenario 2)

시나리오 3. 임의 표적배치 시나리오

시나리오 3에 최적 발사각 시퀀스 결정 모델을 적용하면 다음과 같다.

(1) 예상 표적 조우 지점 및 발사각

예상 표적 조우 지점과 그에 따른 발사각을 구하면 Table 13과 같다.

Table 13. Expected hit position and launch angle (Scenario 3)

Target No.	Expected Hit Position		Launch Angle [deg]
	X [m]	Y [m]	
1	10088	0	0
2	12000	4508	20.59
3	4394	2576	30.38
4	8239	-5000	-31.25
5	6646	-10000	-56.39

(2) 발사각 크기 별 정렬

각 표적에 요구되는 발사각 크기 별로 오름차순으로 정렬하면, 발사각 시퀀스는 Table 14와 같다.

Table 14. Launch angle sequence (Scenario 3)

[TGT#5→TGT#4→TGT#1→TGT#2→TGT#3]

(3) 최적 발사각 시퀀스 결정

제한한 논리에 따라 최종적으로 최적 발사각 시퀀스를 결정하면 Table 15와 같다.

Table 15. Launch angle sequence (Scenario 2)

[TGT#5→TGT#4→TGT#1→TGT#2→TGT#3]

이 결과는 시나리오 3의 준최적 결과로 제시된 Table 6에 포함된 시퀀스이다. 전체 교전 시간이 37.86초로 최적 시퀀스의 전체 교전 시간 36.51초에 매우 근접한 결과를 도출하였다.

(4) 최적 발사각 시퀀스 시뮬레이션 결과

Table 15에 제시된 시나리오 3의 최적 발사각 시퀀스로 교전을 수행하면 Figure 24와 같은 결과를 도출하였다. 본 연구에서 제안한 발사각 시퀀스 결정 논리가 전체 교전 시간 최소화 관점에서 준최적 결과를 보이는 것을 확인했다. 해당 시퀀스로 교전 시, 구동 발사각 및 전체 발사각은 Figure 25와 같이 변화하며 각 단계의 발사대 구동 시간 및 전체 교전 시간은 Figure 26과 같다.

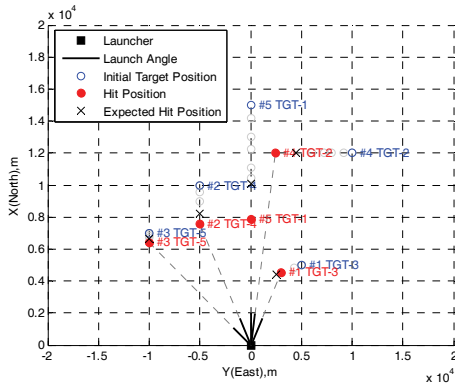


Fig. 24. Engagement result (Scenario 3)

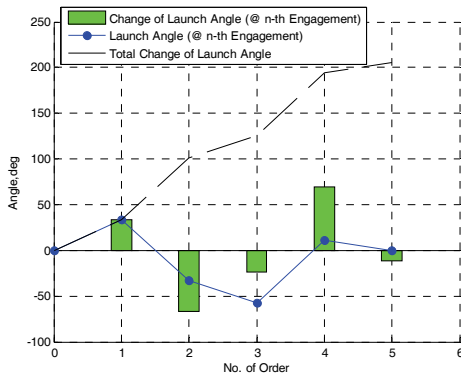


Fig. 25. Result graph of launch angle (Scenario 3)

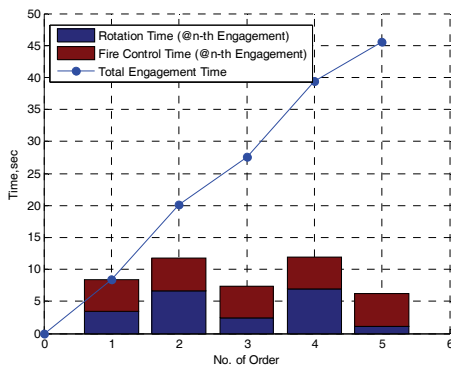


Fig. 26. Result graph of engagement time (Scenario 3)

6. 결론

본 논문에서는 해석적으로 해를 도출하기는 어렵고 인공지능적인 방법으로 해를 찾을 경우 다량의 계산으로

인해 연산 시간이 많이 요구되는 문제를 근사적인 모델링과 시뮬레이션을 통해 해결하는 과정과 결과를 보였다. 다수의 표적에 유도무기를 할당하여 순차적으로 교전하는 문제를 다양한 조건의 예제 시나리오로 구성하여 시뮬레이션을 수행하고 결과를 분석함으로써 일반적인 논리를 도출하고 모델을 제시하였다. 제한한 발사각 시퀀스 결정 모델로부터 도출한 해가 전체 해집합 중 최적 혹은 준최적 결과와 일치함을 보임으로써 모델의 최적성을 검증 하였다. 특히, 수초~수분 이상 소요되는 전체 해집합에 대한 연산 대신 단순화한 모델을 계산하여 그 시간을 단축하면서도 최적에 근접한 해를 찾아냄으로써, 신속한 계산이 요구되는 유도무기체계 발사통제 알고리즘에 실시간 적용 가능성도 보였다.

향후, 유도무기의 종말 기동 및 Off-Axis 교전 능력까지 고려하여 문제를 확장한다면 표적의 그룹화를 통해 보다 효율적인 교전 시퀀스 결정 논리를 제시할 수 있을 것이다. 또한 유도무기의 교전 가능 영역에 대한 제한과 표적의 능력 및 의도성을 고려하여 위협 평가 개념을 추가한다면 더욱 진화한 형태의 최적 발사각 시퀀스 결정 모델이 개발될 수 있을 것이다.

References

Dany Dionne, Edward Pogossian, Arthur Grigoryan, Jean Couture and Elisa Shahbazian (2008) "An Optimal Sequential Optimization Approach in Application to Dynamic Weapon Allocation in Naval Warfare", *11th International Conference on Information Fusion*,

S. Dasgupta, C. H. Papadimitriou, and U. V. Vazirani (2006) *Algorithms*, McGraw-Hill Higher Education.

Cheolwoo Jo, Youngjin Kim, Wong Gie Han (2008) Performance of Weapon Assignment Algorithm for Various Environments, *7th Conference on Naval Weapon Systems*, Daejeon, Korea, 1-8.

(조철우, 김영진, 한웅기 (2008) "무장 및 표적 환경에 따른 무장할당 알고리즘의 성능분석, 제 7회 해양 무기 학술대회, 대전, 대한민국, 1-8.)

In Hyuck Hwang, Jackyou Noh, Kwang Kook Lee, Jongye Shin (2010) "Short-term Scheduling Optimization for Subassembly Line in Ship Production Using Simulated Annealing", *The Korea Society for Simulation*, Vol. 19, No. 1, pp.

73-82.

(황인혁, 노재규, 이광국, 신중계(2010) “시물레이터드 어닐링을 활용한 조선 소조립 라인 소일정계획 최적화”, 한국시물레이션학회 논문지 Vol. 19, No. 1, pp. 73-82.)

Ji Eun Kim, Jin Hwa Shin, Kil Seok Cho (2010) “A Weapon Assignment Algorithm Using the Munkres Optimal Assignment Method”, *Journal of the KIMST*, V.13, n.1, 1-8.

(김지은, 신진화, 조길석 (2010) “Munkres 최적할당 기법을 적용한 무기할당 알고리즘”, 한국군사과학기술학회지 제 13권 제 1호, 1-8.)

Ji Eun Kim, Jin Hwa Shin, Kil Seok Cho, Dong-Gwan Lee, Myong-Hwan Yoo, Jae-Woo Kwon (2012) “An Engagement Decision Algorithm Of Simultaneous Engagement For Multiple Targets in Missil System”, *Proceedings of 2005 Annual Conference on KIMST*, 410-413.

(김지은, 신진화, 조길석, 이동관, 유명환, 권재우 (2012) “다수 표적 동시 교전을 위한 유도무기체계의 교전결심 자동화 알고리즘”, 2012년 한국군사과학기술학회 종합학술대회, 410-413.)

Lloyd S. P., H. S. W. (1986) “Weapon Allocation is NP-complete”, *Proceedings of the IEEE Summer Simulation Conference*, Reno Nevada.

James Munkres (1957) “Algorithms for the Assignment and Transportation Problems”, *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, Vol. 5, No. 1, 32-38

JN Roux, JH van Vuuren (2007) “Threat evaluation and weapon assignment decision support: A review of the state of the art”, *ORiON*, Vol. 23(2), pp. 151-187, 2007.

Stephane Paradis, Abderrezak Benaskeur, Martin Oxenham and Philip Cutler (2005) “Threat Evaluation and Weapon Allocation in Network-Centric Warfare”, *7th International Conference on Information Fusion*, Stockholm, Sweden, 1078-1081



류 선 미 (sunmeeryu@gmail.com)

2009 KAIST 항공우주공학과 학사

2011 KAIST 항공우주공학과 석사

2011~2013.9. LIG넥스원 연구원

2013.10.~현재 국방과학연구소 연구원

관심분야 : 유도무기체계, 모델링&시물레이션