

방공교전에서의 동적 무기-표적 할당을 위한 Rolling-Horizon 스케줄링 알고리즘 Rolling-Horizon Scheduling Algorithm for Dynamic Weapon-Target Assignment in Air Defense Engagement

저자 (Authors)	정신기, 엄현섭, 이영훈 Sin Ki Jeong, Hyun Seop Uhm, Young Hoon Lee
출처 (Source)	대한산업공학회지 46(1) , 2020.2, 11-24(14 pages) Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers 46(1) , 2020.2, 11-24(14 pages)
발행처 (Publisher)	대한산업공학회 Korean Institute Of Industrial Engineers
URL	http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE09300906
APA Style	정신기, 엄현섭, 이영훈 (2020). 방공교전에서의 동적 무기-표적 할당을 위한 Rolling-Horizon 스케줄링 알고리즘. 대한산업공학회지, 46(1), 11-24
이용정보 (Accessed)	한남대학교 203.247.32.*** 2021/11/23 09:48 (KST)

저작권 안내

DBpia에서 제공되는 모든 저작물의 저작권은 원저작자에게 있으며, 누리미디어는 각 저작물의 내용을 보증하거나 책임을 지지 않습니다. 그리고 DBpia에서 제공되는 저작물은 DBpia와 구독계약을 체결한 기관소속 이용자 혹은 해당 저작물의 개별 구매자가 비영리적으로만 이용할 수 있습니다. 그러므로 이에 위반하여 DBpia에서 제공되는 저작물을 복제, 전송 등의 방법으로 무단 이용하는 경우 관련 법령에 따라 민, 형사상의 책임을 질 수 있습니다.

Copyright Information

Copyright of all literary works provided by DBpia belongs to the copyright holder(s) and Nurimedia does not guarantee contents of the literary work or assume responsibility for the same. In addition, the literary works provided by DBpia may only be used by the users affiliated to the institutions which executed a subscription agreement with DBpia or the individual purchasers of the literary work(s) for non-commercial purposes. Therefore, any person who illegally uses the literary works provided by DBpia by means of reproduction or transmission shall assume civil and criminal responsibility according to applicable laws and regulations.

방공교전에서의 동적 무기-표적 할당을 위한 Rolling-Horizon 스케줄링 알고리즘

정신기[†] · 엄현섭 · 이영훈

연세대학교 산업공학과

Rolling-Horizon Scheduling Algorithm for Dynamic Weapon-Target Assignment in Air Defense Engagement

Sin Ki Jeong[†] · Hyun Seop Uhm · Young Hoon Lee

Department of Industrial Engineering, Yonsei University

In the real-world air defense operations, efficient weapon-target assignment is essential for the successful protection of defensive assets under the limited capability of simultaneous engagement of radars and the restricted number of weapons. Also the assignment must be adjusted dynamically according to the battle environment where trajectory of targets and engagement results are continuously changing. This study presents a mathematical model based on rolling-horizon scheduling algorithms for the dynamic weapon-target assignment decision making. The performances are evaluated for the various test scenarios under the consideration of the actual air defense operation, which are compared with the Shoot-Look-Shoot algorithm, the typical air defense policy. The results show the superiority of the proposed rolling-horizon scheduling algorithm in most of test scenarios.

Keywords: Dynamic Weapon-Target Assignment, Rolling-Horizon Scheduling Algorithm, Air Defense Engagement

1. 서 론

방공작전은 적 항공기와 같은 공중위협으로부터 아군의 방어 자산을 보호하는 것을 의미하며, 방공작전의 무기-표적 할당문제는 대표적인 의사결정 사례이다. 무기-표적 할당문제는 최대 교전효과 달성을 위해 최적의 교전계획(무기-표적 조합 및 사격시점)을 결정하는 것으로 제조현장에서 제한된 자원을 할당하는 것과 동일한 관점에서 접근할 수 있다. 그 이유는 방공작전시 레이더가 동시에 유도 가능한 무기 수량인 동시교전능력이 일정한 수로 제한되며, 표적의 궤적과 격추결과가 실시간으로 변하는 환경에서 무기를 효율적으로 할당하기 위한 동적 의사결정이 필요하기 때문이다. 이러한 무기-표적 할당문제는 무기와 표적 특성, 방어자산 중요도, 기타 제한요소 등을 어떻게 설정하느냐에 따라 다양한 방향으로 확장될 수 있다.

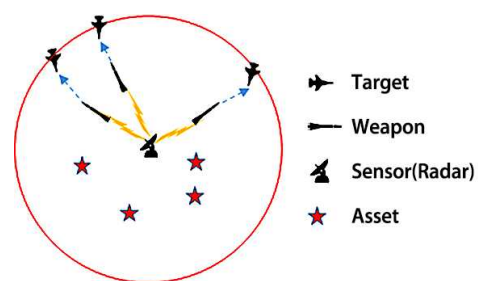


Figure 1. Concept of Weapon-Target Assignment

<Figure 1>과 같이 무기-표적 할당은 표적을 실시간으로 탐지 및 평가하고, 이 표적에 대해 가용한 무기와 레이더 자원을 할당하여 아군의 방어자산을 보호한다(Roux *et al.*, 2007). 이러한 방공교전시에는 무기를 표적까지 유도하기 위해 레이더

이 논문은 국방과학연구소(ADD, 계약번호 UD180034ED)의 지원을 받아 수행되었음.

[†] 연락저자 : 정신기 석사과정, 서울특별시 서대문구 연세로 50 연세대학교 제4공학관 D1010, Tel : 02-364-0860, Fax : 02-364-7807,

E-mail : stormjsk@naver.com

2019년 7월 30일 접수; 2019년 9월 18일 수정본 접수; 2019년 10월 15일 게재 확정.

채널을 점유하여 표적의 위치 및 속도 정보를 실시간으로 제공한다.

공중전장에는 다수의 표적이 존재하며 다수의 무기로 동시에 교전이 발생하는 특성을 갖는다. 따라서 표적을 효과적으로 제압하기 위해 전장상황을 종합적으로 고려한 최적 교전계획을 최단시간내 수립하고 수행하여야 한다. 즉 다수 무기와 다수 표적이 존재하는 전장환경에서 무기-표적 할당시에는 최대 교전효과를 달성하는 ‘효과성’ 측면과 전장환경의 실시간 변화를 반영하는 ‘신속성’ 측면을 모두 고려하여야 하며, 작전 상황에 따라 합리적인 수준에서 이 두 가지 측면의 균형을 조절하여야 한다(Yoon, 2018). 또한 하나의 표적에 무기를 할당하는 것은 나머지 표적에 무기를 할당하는 것에도 영향을 미치게 된다(Kim *et al.*, 2010). 따라서 이후의 모든 교전이 종료된 후의 전체적인 관점에서 가장 효과적인 무기할당을 수행할 필요가 있다.

방공교전에는 할당된 시간이 경과하면 작업이 완료되는 일반적인 스케줄링 환경과는 달리, 무기에 할당된 레이다 채널 점유시간이 경과하여도 표적 격추여부가 확률적으로 결정되는 불확실성이 존재한다. 또한 방공교전에서는 상황이 급변하기 때문에 단순히 어떤 표적에 어떤 무기를 할당할지만 결정하는 비연속적인 의사결정이 아니라, 특정 시점의 표적 궤적과 격추결과가 업데이트되어 다음 의사결정에 반영되는 연속적인 방식으로 접근하여야 한다. 이를 위해 최초 스케줄링 수행 시점에 존재하는 모든 표적에 대해 교전계획을 수립하고, 그 이후부터 모든 교전이 종료될 때까지 스케줄링을 반복하는 개념이 적용되어야 한다. 결과적으로, 방공교전에서 스케줄링이 수행되면 매 시점마다 변하는 상황에 따라 현시점에 진행 중인 교전계획을 지속하거나, 발사된 무기손실을 감수하고 전체 교전효과를 최대로 하는 새로운 교전계획을 진행할 수 있다. 이에 본 논문은 방공교전에서의 동적 무기-표적 할당을 위한 Rolling-Horizon 스케줄링 알고리즘을 제안하고자 한다. 한편 본 연구에서 스케줄링은 전장상황을 반영하여 교전계획을 작성하는 의사결정 과정으로, 교전계획은 스케줄링을 통해 작성된 무기-표적 조합 및 사격시점으로 정의한다.

논문의 구성은 다음과 같다. 제 2장에서는 기존에 제안된 무기-표적 할당문제 관련 연구를 분석하고, 기존 연구의 한계와 본 연구의 목적을 제시한다. 제 3장에서는 본 논문에서 다루는 무기-표적 할당문제 정의 및 Rolling-Horizon 스케줄링 알고리즘을 제안한다. 제 4장에서는 실험을 통해 제안하는 알고리즘과 기존 알고리즘의 성능을 비교하고 제안하는 알고리즘의 타당성을 검증한다. 마지막 제 5장에서는 결론과 향후 발전방향을 제시한다.

2. 관련 연구

무기-표적 할당문제는 복잡도가 NP-Complete인 전형적인 문제이며, 무기와 표적의 수량이 증가할수록 최적해를 찾는 시

간이 기하급수적으로 증가한다고 알려져 있다(Lloyd *et al.*, 1986). 일반적으로 무기-표적 할당문제는 정적 무기-표적 할당(Static-WTA)과 동적 무기-표적 할당(Dynamic-WTA)로 분류된다(Jang *et al.*, 2015). 정적 무기-표적 할당은 의사결정에 필요한 정보를 고려하여 한 번의 의사결정을 통해 전체 교전계획을 작성하는 방법이다. 이에 반하여 동적 무기-표적 할당은 의사결정이 반복적으로 이루어진다. 개념적으로 동적 무기-표적 할당은 정적 무기-표적 할당의 연속적인 과정으로 볼 수 있으며, 동적 무기-표적 할당에서는 각 의사결정의 결과가 평가되고, 이 평가결과가 다음 의사결정에 반영되어 교전계획이 도출된다.

먼저 정적 무기-표적 할당문제에 대해서는 최적해를 도출하는 방안이 주로 연구되었다. Wacholder(1989)는 탄도미사일 방어를 위한 정적 무기-표적 할당문제에 대해 신경망 기반 알고리즘을 제안하였다. 파괴되지 않고 생존한 탄도미사일의 총 가치를 최소화하는 목적함수를 사용하였으며, 표적별로 할당 가능한 최소 및 최대 무기 수량, 총 무기 보유 수량 등을 제약조건으로 사용하여, 최적의 해를 도출하는데 집중하였다. Johansson *et al.*(2009)은 예상되는 생존표적 가치의 총합을 최소화하는 목적함수를 사용하여 정적 무기-표적 할당문제에서 최적해를 찾는 연구를 수행하였다. 이때 전역 탐색 알고리즘(Exhaustive Search Algorithm)을 활용하여 실시간으로 최적해 도출이 가능한 문제의 크기(무기-표적 수량)를 찾는 연구를 수행하였다.

한편 동적 무기-표적 할당문제에 대해서는 시간 개념(스테이지, 슬롯, 윈도우 등)이 적용되어 주로 연구되었다(Lee *et al.*, 2015). 이는 동적 무기-표적 할당이 정적 무기-표적 할당보다 시간변화에 따른 교전상황을 더 실제적으로 다루기에 적합하기 때문이다. Hosein(1989)은 시간 스테이지 개념을 적용하여 다수의 시간 스테이지가 존재하는 교전상황을 동적(Dynamic) 무기-표적 할당문제로, 시간 개념을 적용하지 않고 의사결정에 필요한 모든 정보를 고려하여 한 번에 무기를 할당하는 교전상황을 정적(Static) 무기-표적 할당문제로 구분하였다. 이때 탄도미사일 방어상황에서 생존한 방어자산의 가치를 최대화하거나, 파괴되지 않고 생존한 탄도미사일의 가치를 최소화하는 목적함수를 사용하였으며, 최적해 도출을 위해 동적계획법을 적용하였다. Khosla(2001)는 시간 슬롯 개념을 적용하는 동적 무기-표적 할당 모형을 제안하였으며, 교전이 발생할 수 있는 전체 시간을 일정한 간격의 슬롯으로 정의하였다. 이때 격추된 표적의 총 위협가치와 표적에 할당된 미사일의 총 적함도에 가중치를 부여한 뒤 이를 최대화하는 목적함수로 하며, 실제 교전상황을 고려하여 미사일 발사 가능 시간, 레이다 동시교전능력 등을 제약조건으로 활용하였다. Karasakal(2004)은 함정 대공방어를 위한 무기-표적 할당문제에 시간 윈도우 개념을 적용하였으며, 실제 사격이 가능한 시간을 윈도우로 정의하였다. 또한 다양한 종류의 미사일 교전전략을 제시하고, 무기 수량, 교전시간 제한, 미사일 교전준비시간 등을 모형에 현실적으로 반영하였으며, 이를 선형정수계획법으로 접근하였다. Lee(2009)는 단거리 지대공 미사일을 활용하여 표적을

요격하는 무기-표적 할당문제에 시간 윈도우 개념을 포함하였으며, 방공작전의 가용시간 내에서 해를 도출하며 표적의 위협도를 충분히 감소시킬 수 있는 휴리스틱 알고리즘 개발에 집중하였다.

대부분의 기존 연구는 무기-표적 할당문제를 위한 다양한 알고리즘 구현에 집중하여, 지역탐색 알고리즘(Local Search)이나 최적 탐색 알고리즘(Exact Search Algorithm) 등과 같이 최적해를 찾기 위한 알고리즘을 제안하였다. Rosenberger *et al.* (2005)은 전통적이지만 확장성이 큰 탐색 트리 모델과 분기 한정 알고리즘(Branch and Bound Algorithm) 등을 활용한 연구를 수행하였다. Lee *et al.* (2015)은 탄도미사일 방어를 위해 요격 고도를 최대화 하는 목적함수를 적용하고, 시간 윈도우 개념을 적용하여 요격미사일 발사를 위한 발사지연 시간, 동시교전능력 등을 반영한 모형을 제시하였다. 이 모형을 혼합정수 계획법으로 해를 찾는 연구를 수행하였다.

하지만 최적해 탐색 알고리즘은 무기와 표적의 수가 증가함에 따라 계산시간이 오래 걸리기 때문에 소규모 전장환경에만 제한적으로 적용할 수 있고, 다수 표적과 다수 무기가 존재하며 상황이 급격하게 변하는 상황에서는 신속하게 반응할 수 없다. 이에 일반적인 방공작전 환경에서 신속한 의사결정을 지원하기 위해 다양한 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm), 타부 탐색 알고리즘(Taboo Search algorithm), 경매 알고리즘(Auction Algorithm), 개미군집최적화 알고리즘(Ant Colony Optimization Algorithm) 등과 같은 휴리스틱 알고리즘을 활용한 연구가 진행되고 있다(Hong *et al.*, 2012). Lee *et al.* (2002a)은 모든 무기를 할당하면서 예상되는 방어자산 피해를 최소화하는 목적함수를 사용하며, 지역탐색에서 유전자 연산자(Genetic Operator)를 통해 최적해 또는 최적에 가까운 근사해를 도출하고, 그 값을 진화시켜나가는 유전자 알고리즘을 제안하였다. Bogdanowicz (2009)는 현대 스마트 무기의 특성을 고려하여, 경매 알고리즘(Auction Algorithm)을 기반으로 하는 센서-무기-표적 할당 모형을 제안하였다. 기존 무기-표적 조합에 센서-무기 조합을 추가하여 복잡해진 문제를 해결하기 위해 센서/표적/무기를 분해하고, 대칭 최적화 문제로 변환한 뒤 해를 구하는 Swt-opt 알고리즘을 연구하였다. Lee *et al.* (2002b)는 개미군집최적화 알고리즘(Ant Colony Optimization Algorithm)을 기반으로 면역체계(Immune System)를 적용하였으며, 이를 통해 지역탐색시 효율성을 높이면서 해의 품질을 저하시키지 않기 위하여 휴리스틱 알고리즘 연구를 수행하였다. Blodgett *et al.* (2003)은 대함미사일 방어상황에서 생존한 함정의 수를 최대화하는 목적함수를 가지고, 타부 탐색 알고리즘(Tabu Search Algorithm)을 활용하여 지역탐색시 순환검색을 피하면서 좋은 해를 얻을 수 있도록 하였다. Kim *et al.* (2010)은 Munkres 알고리즘을 통해 음수가 아닌 cost 행렬의 합이 최소가 되는 무기할당 결과를 도출하였으며, 탐색트리 모델 기반의 최적 알고리즘인 Exhausted Search Algorithm과 탐욕 알고리즘인 Depth First Search Algorithm을 적용한 후 비교하여 합리적인 시간 내에 좋은 성능의 해를 도출하는 연구를 수행하였다. Cha *et al.* (2019)는 포병부대의 표적

할당 및 사격일정계획 수립을 위하여 동적계획법(Dynamic Programming)으로 표적-포병부대를 할당하고 분기 한정 알고리즘을 사용하여 포병부대의 사격 스케줄을 결정하는 2단계 휴리스틱 알고리즘을 제안하였다. 위와 같이 기존 휴리스틱 알고리즘을 개선하거나 새로운 알고리즘 개발에 집중하는 연구뿐 아니라, 타부탐색 알고리즘-유전자 알고리즘 융합과 같이 다양한 알고리즘이 조합된 하이브리드 알고리즘 연구도 최근 지속되고 있다. 그러나 각 연구에서 정의하는 문제특성과 시간효율성을 충족시키기 위해 제약조건을 단순화하는 등 조건에 따라 모든 사례에 적용하기 어렵다는 한계점이 있다.

한편 시간 개념의 적용 유무에 따라 무기-표적 할당문제를 정적과 동적 무기-표적 할당으로 구분하기도 하지만, 목적함수에 따라 구분하는 방법도 존재한다. 기존 연구에서는 목적함수가 표적이 가지는 위협가치의 최소화로 하는 경우 표적기반(Target Based) 무기-표적 할당으로, 보호해야 하는 방어자산의 생존가치를 최대화 하는 경우에는 자산기반(Asset Based) 무기-표적 할당이라 구분한다(Johansson, 2010). 대부분의 연구는 표적기반 무기-표적 할당문제에 집중되었다. 자산기반 무기-표적 할당에 관한 연구로 Jang *et al.* (2015)는 짧은 시간 내 최적의 요격포대를 선정하고 미사일 할당이 요구되는 탄도미사일 방어상황을 자산기반 무기-표적 할당문제로 보고, 시간변수와 Shoot-Look-Shoot 알고리즘을 추가한 모형으로 선형 근사화한 뒤 혼합정수계획법으로 해를 찾는 연구를 수행하였다. Kim *et al.* (2017)은 탄도미사일방어를 위한 자산기반 무기-표적 할당문제에 양자화 알고리즘을 제안하였으며, 이를 일반적인 유전자 알고리즘, 돌연변이 연산을 추가한 혼합 양자화 알고리즘과 비교 검증하여, 해의 품질은 미세하게 떨어지지만, 처리속도가 상대적으로 우수함을 보여주었다.

그 외에도 동적 무기-표적 할당문제에 스케줄링 알고리즘을 적용한 사례도 있다. Nacem *et al.* (2010)은 동적 무기-표적 할당문제를 실시간 스케줄링 문제의 특별한 사례로 보고, 특정 제약조건하에서 무기와 표적을 각각 기계와 처리되어야 하는 작업으로 가정하여 접근하였다. 이때 안정된 결혼 알고리즘(Stable Marriage Algorithm)을 변형하여 표적의 위협을 계산하고 무기-표적을 할당하는 2단계 접근방식을 사용하였다. 하지만 불확실한 교전상황이 존재하는 동적 무기-표적 할당에 스케줄링 알고리즘을 적용한 연구는 다소 부족하였다. 이에 본 연구에서는 실시간 표적 제적과 교전결과에 따라 기존 교전계획을 변경할 수 있도록 동적 무기-표적 할당문제에 스케줄링 알고리즘을 적용하며, 이를 통해 좋은 결과(최대 교전효과)를 달성할 수 있음을 보여줌과 동시에 시간효율성 측면에서도 접근하고자 한다.

3. 문제정의

본 연구에서는 방공교전의 특수성을 제약조건으로 반영하여 현실성 있는 무기-표적 할당 알고리즘을 제안하고자 한다. 무기-

표적 할당은 일반적으로 위협평가(Threat Evaluation) 후 무기 할당(Weapon Assignment) 및 스케줄링 단계를 거쳐 수행된다. 위협평가는 표적의 공격 위협을 평가하고, 정량화된 위협도로 도출하는 과정이다. 무기할당 및 스케줄링 단계는 앞서 도출된 위협도에 따라 무기할당을 수행하고, 교전계획에 따라 실제 교전을 수행하는 과정이다(Yoon, 2018). 이후에는 최종 교전이 종료되기 전까지 시간별로 변하는 표적 상황을 반영하여 위협평가부터 무기할당 및 스케줄링이 반복적으로 수행되는 알고리즘을 적용하였다.

3.1 표적 위협평가(Threat Evaluation)

무기-표적 할당을 위해 무기할당(Weapon Assignment) 및 스케줄링시 위협도와 불리는 표적정보가 입력되어야 한다. 이를 위해 아군의 방어자산을 목표로 하는 모든 표적에 대해 다양한 위협평가요소를 사용하여 각 표적이 갖는 위협도를 결정하고, 계산된 위협도에 따라 최적의 무기할당을 위한 위협우선순위를 도출하는 위협평가가 수행된다(Nacem *et al.*, 2009). 이후 언급되는 위협평가 방법들은 무기-표적 할당을 위해 본 논문에서 제안하는 동적 스케줄링 알고리즘과 벤치마크 알고리즘에 동일하게 적용된다.

위협평가 방법론은 일반적으로 표적의 위치, 속도, 방위각을 사용하며, 대표적인 방법론으로 <Figure 2(a)>와 같이 최소 근접거리 우선 방법과 <Figure 2(b)>와 같이 최대 접근속도 우선 방법이 있다(Lee *et al.*, 2017). 두 방법 모두 방어자산에 가장 빨리 도달하는 표적에 높은 위협도를 부여한다. 기존 연구에서는 위의 위협평가 방법을 각각 CPA(Closest Point of Approach) 방법(Johansson *et al.*, 2008)과 RSV(Radial Speed Vector)으로 명명하기도 한다(Hong *et al.*, 2011). 또한 본 연구에서는 표적의 공격목표(방어자산)를 특정하지 않고 하나의 표적이 각 방어자산에 대해 가지는 모든 위협도를 반영하기 위하여, 최소 근접거리 우선 방법에 기반한 평균 근접거리 우선 방법을 추가로 적용한다.

한편 위의 방법들은 표적의 공격목표(방어자산)를 예상함에 있어 실제 공격목표보다 표적과 가장 가까운 방어자산을 공격목표로 평가할 가능성이 있으며, 상황이 전개되면서 표적이 실제 공격목표에 인접할 때 위협평가 성능이 향상되는 특성을 가진다. 또한 위협평가 방법론은 표적이 무기 발사대로부터 일정한 위협거리 안으로 진입하면서 아군 방어자산에 접근하는 것을 전제로 한다.

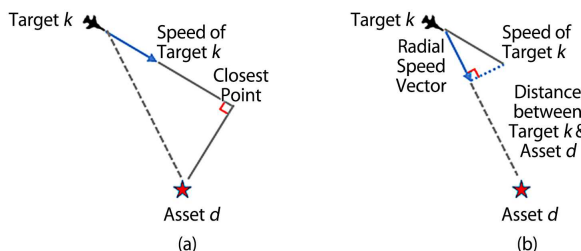


Figure 2. Methods of Threat Evaluation

예를 들어 시간이 경과하면서 표적이 방어자산에 접근하지 않고 위협거리 바깥으로 이탈하는 경우에는 해당 표적에 대해서는 위협평가가 수행되지 않아 위협도를 계산할 수 없게 된다. 따라서 본 연구에 적용되는 모든 실험설정 등은 표적이 시간 경과에 따라 방어자산에 접근하는 것으로 가정한다.

아래는 앞서 언급한 3가지 위협평가 방법에 대한 설명과 계산식을 제시한다.

- v_k : 표적 k 의 위협도
- u_d : 방어자산 d 의 가치
- d^* : 표적 k 가 가장 빨리 도달하는 방어자산 d
- H_{kd} : 표적 k 가 최근접점을 거쳐 방어자산 d 에 도달하는데 걸리는 시간
- α : 위협도 계산시 가중평균을 적용하기 위한 가중치 ($\alpha \geq 1$, 본 논문에서는 $\alpha = 1$ 로 설정)
- $\overline{S_{kd}}$: 표적 k 가 속도벡터 방향으로 방어자산 d 에 도달하는데 걸리는 시간

(1) 최소 근접거리 우선 방법(Minimum Closest Point of Approach)

최소 근접거리 우선 방법은 표적이 최근접점을 거쳐 방어자산에 도달하는데 걸리는 시간을 계산한다. 표적이 모든 방어자산별로 도달하는 시간을 계산하고, 그중 가장 빨리 도달하는 방어자산의 가치가 해당 표적의 위협도가 된다(Hong *et al.*, 2011).

$$v_k = u_{d^*} \text{ where } d^* = \underset{d}{\operatorname{argmin}}(H_{kd}) \quad (1)$$

(2) 평균 근접거리 우선 방법(Average Closest Point of Approach)

평균 근접거리 우선 방법은 표적이 최근접점을 거쳐 모든 방어자산별로 도달하는데 걸리는 시간을 계산하고, 각 방어자산에 대해 표적이 갖는 위협을 모두 고려한 가중평균값(가중치 $\alpha \geq 1$, 본 논문에서는 $\alpha = 1$ 로 설정)이 표적 위협도가 된다.

$$v_k = \sum_d (u_d \times H_{kd}^{-\alpha}) / \sum_d (H_{kd}^{-\alpha}) \quad (2)$$

(3) 최대 접근속도 우선 방법(Maximum Approach Speed)

최대 접근속도 우선 방법은 표적이 비행하는 방향에서 방어자산으로 향하는 속도벡터(RSV)를 고려하여 원심방향의 방어자산에 도달하는 시간을 계산한다. 각 표적에 대해 모든 방어자산에 도달하는 시간을 계산하고, 가장 빨리 도달하는 방어자산의 가치가 해당 표적의 위협도가 된다(Hong *et al.*, 2011).

$$v_k = u_{d^*} \text{ where } d^* = \underset{d}{\operatorname{argmin}}(\overline{S_{kd}}) \quad (3)$$

3.2 무기할당(Weapon Assignment) 및 스케줄링 단계

무기-표적 할당의 핵심인 무기할당 및 스케줄링 단계에서는 위협평가에서 도출한 위협우선순위를 기반으로 표적에 무기

를 할당하는 최적 교전계획을 작성한다. 이때 사전에 정의된 무기-표적 거리별 격추확률과 무기의 동시교전능력, 무기 보유수량, 최대 교전거리 등을 고려하여 최대 교전효과를 달성하는 무기-표적조합 및 사격시점이 결정된다. 표적 위협도가 높은 경우에는 필요에 따라 하나의 표적에 다수의 무기가 할당될 수도 있다.

본 논문의 무기-표적 할당문제에서 다루는 교전환경은 다음과 같이 가정한다.

- 무기-표적 할당은 표적 탐지 → 위협평가 및 무기할당 → 교전계획 시행 → 교전결과 확인 순으로 진행된다.
- 레이더는 발사된 무기를 주파수 채널을 통해 표적까지 유도하며, 레이더가 동시에 유도 가능한 무기수량인 동시교전능력은 일정한 수로 제한된다.
- 각 발사대에는 다수의 무기가 탑재되고, 각 발사대에서 발사된 무기는 서로 독립적으로 표적을 파괴한다.
- 표적 위치/속도를 기반으로 위협평가를 통해 위협도에 따른 위협우선순위를 생성한다.
- 무기 속도, 최대 교전거리, 동시교전능력, 가용 무기수량, 방어자산 가치에 따른 교전효과, 위협우선순위를 고려하여 교전계획을 결정한다.
- 충분한 교전기회 확보를 위해 표적이 일정한 위협거리 내로 진입시 스케줄링을 수행하며, 지속적으로 표적 정보를 업데이트하고, 방어자산에 도달한 표적은 스케줄링에서 제외한다.
- 표적과 교전에 필요한 무기와 레이더 주파수 채널이 가용할 때만 신규 교전이 시작된다.
- 무기가 표적에 할당되어 계획된 교전을 취소하고, 새로운 무기를 할당하여 교전을 시작할 경우에는 임무 재할당 시간이 소요된다.
- 무기-표적 할당 스케줄링은 하나의 교전이 종료될 때 또는 일정한 주기마다 반복된다.

앞서 제시한 바와 같이 무기-표적 할당 과정에서는 특정 시점의 표적 정보를 바탕으로 일련의 위협평가 및 무기할당 단계가 수행된다. 만약 표적의 속도와 방향이 방어자산에 도달할 때까지 일정하게 유지된다면 교전계획에 따라 무기를 발사하는 것만으로도 최대의 교전효과를 달성할 수 있을 것이다. 하지만 표적의 궤적이 변하고, 교전에 따른 표적 격추가 불확실성을 갖기 때문에 근접거리 우선, 접근속도 우선 등의 위협평가 방법을 통해 계산한 표적의 위협도 또한 변하게 된다. 이러한 상황은 위협우선순위에 기반한 최적 교전계획에도 연쇄적인 영향을 미치며, 최적 의사결정 관점에서 분명 바람직하

지 않다. 특히 방공작전의 불확실성과 급변하는 작전상황이 의사결정에 신속하게 반영되어야 한다. 따라서 본 논문에서는 스케줄링시마다 현재시점으로부터 일정한 미래시점까지의 상황을 고려하여 최적 교전계획을 작성하되, 이 교전계획에 따라 실제 무기가 발사된 경우에는 교전결과를 반영하여 교전이 종료될 때까지 위협평가 및 스케줄링이 반복되도록 하였다. <Figure 3>과 같이 Rolling-Horizon 스케줄링 알고리즘을 적용한 동적 무기-표적 할당문제를 다룬다. 예를 들어, 시점 0에서 수행되는 첫 번째 스케줄링에서는 시점 1부터 시점 7까지의 스케줄링 구간(Scheduling Period, SP)에 대하여 교전계획을 작성하는 것이며, 이후 매 스케줄링 시점마다 동일한 스케줄링 구간에 대하여 교전계획을 재작성하는 것이다.

한편 의사결정에 있어 시간 효율성도 매우 중요하다. 무기-표적 할당문제는 최적해를 찾는 데 상당한 시간이 소요되어, 급격하게 변하는 상황에 신속하게 반응할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 실시간 상황변화를 효율적으로 반영하며 해를 신속하게 찾을 수 있도록 휴리스틱 알고리즘을 사용하여 동적 무기-표적 할당문제를 다룬다.

본 논문에서는 무기-표적 할당시 현재시점으로부터 일정한 미래시점까지의 상황을 고려하는 두 가지 동적 스케줄링 알고리즘을 제안한다. 그 중 하나는 매 교전이 종료될 때마다 스케줄링이 수행되며, 스케줄링시 무기가 발사되어 진행 중인 기존 교전은 취소하지 않는 방식이다. 다른 하나는 일정한 주기마다 스케줄링이 수행되며, 스케줄링시 기존에 무기가 발사되어 진행 중인 교전을 취소할 수 있는 방식이다. 위와 같이 두 가지 알고리즘을 제안하는 것은 동적 스케줄링 알고리즘이 시간이 지나면서 표적의 궤적과 격추결과를 지속적으로 업데이트하고 교전계획에 반영하기 때문이다. 예를 들어 교전계획에 따라 무기가 발사되어 비행 중인 상황에서, 전체 교전효과를 최대로 하는 새로운 교전계획이 작성되면, 동시교전능력이 제한되므로 무기가 발사된 기존 교전을 취소한 뒤 새로운 무기를 발사할 수도 있다. 이때 새로운 교전계획이 더 좋은 효과를 달성할 수도 있지만, 방공교전의 불확실성 때문에 교전 취소가 무기의 손실과 발사된 무기의 교전기회를 제한하는 결과로 이어질 수도 있다. 또한 기존에 포착되지 않았던 표적이 급작스럽게 출현하거나, 작전상 진행 중인 교전 취소가 필요할 수도 있기 때문이다. 따라서 위의 상황을 고려하여 스케줄링 시기와 진행 중인 교전 취소가능 여부에 차이를 둔 두 가지 스케줄링 알고리즘을 제안하였다. 스케줄링 알고리즘 기반의 수리모형에서 공통으로 사용되는 인덱스, 파라미터는 다음과 같다. 또한 다음에 언급되는 수리모형에서 스케줄링 시점 $s = \bar{s}$ 로 가정한다.

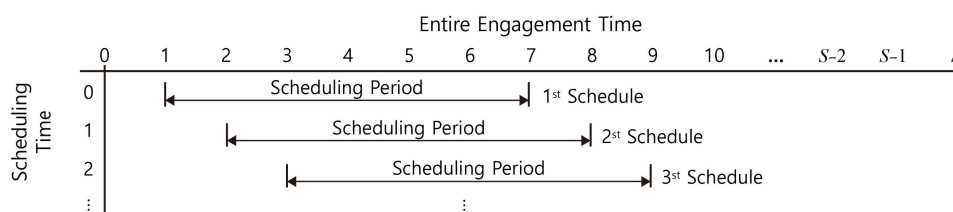


Figure 3. Concept of Rolling-Horizon Scheduling Algorithm

- 인덱스

$i \in I$: 레이더 채널 집합

$j \in J$: 무기 집합

$k \in K$: 표적 집합

$t \in T(\bar{s})$: 스케줄링 시점 \bar{s} 에서의 교전구간 $[0, 1, \dots, \bar{s} + SP]$

- 파라미터

$v_k^{\bar{s}}$: 스케줄링 시점 \bar{s} 에서 표적 k 의 위협도

$C_j^{\bar{s}}$: 스케줄링 시점 \bar{s} 에서 무기 j 의 잔여 수량

O_{ijk}^t : 시간 t 에서 레이더 채널 i 와 무기 j 가 표적 k 에 할당된 교전계획이 실제로 진행되면 1, 아니면 0

P_{jk}^t : 시간 t 에서 무기 j 에 의해 표적 k 가 파괴될 확률

F_{jk}^t : 시간 t 로부터 무기 j 가 표적 k 에 도달하는데 소요되는 비행시간

R_j : 무기 j 의 재장전에 소요되는 시간

- (1) 다중구간-사건기반 스케줄링 알고리즘(ESAM)

스케줄링 알고리즘을 이용한 첫 번째 수리모형은 다중구간-사건기반 스케줄링 알고리즘(ESAM : Event-triggered Scheduling Algorithm with Multi-period)으로 명명한다. 이 알고리즘은 하나의 교전이 종료된 후 스케줄링이 수행되는 것이 가장 큰 특징이며, 매 스케줄링마다 현재시점으로부터 일정한 미래시점까지의 상황을 고려하여 최적 교전계획을 작성하되, 이 교전계획에 따라 실제 무기가 발사된 경우에는 해당 교전이 종료된 후 교전결과 및 위협 평가 결과를 반영하여 스케줄링이 재수행되도록 하였다. 스케줄링 시점 $s = \bar{s}$ 에서 스케줄링을 통해 교전계획을 작성하는 다중구간-사건기반 스케줄링 알고리즘(ESAM) 수리모형은 아래와 같다.

- 결정변수

x_{ijk}^t : 시간 t 에서 시작되는 교전계획에 레이더 채널 i 와 무기 j 가 표적 k 에 할당되면 1, 아니면 0

- 목적함수

$$\max \sum_k v_k^{\bar{s}} \times [1 - \prod_{i,j,t} (1 - P_{jk}^t)^{(x_{ijk}^t + O_{ijk}^t)}] \quad (4)$$

- 제약조건

$$\sum_{i,t,k} x_{ijk}^t \leq C_j^{\bar{s}} \quad \forall j \quad (5)$$

$$\sum_{i,j,k} \sum_{t \leq \bar{s}} x_{ijk}^t = 0 \quad (6)$$

$$\sum_{j,k} x_{ijk}^t \leq 1 \quad \forall i, \bar{s} < t \quad (7)$$

$$\sum_{i,k} x_{ijk}^t \leq 1 - \sum_{i,k} \sum_{t' \geq t - R_j}^{t' \leq t} (x_{ijk}^{t'} + O_{ijk}^{t'}) \quad \forall j, t \quad (8)$$

$$\sum_{j,k} x_{ijk}^t \leq 1 - \sum_{j,k} \sum_{t' \geq t - F_{jk}^t}^{t' \leq t} (x_{ijk}^{t'} + O_{ijk}^{t'}) \quad \forall i, t \quad (9)$$

목적함수 식 (4)는 무기를 표적에 할당 및 교전을 수행하고, 모든 교전종료 후 파괴한 표적 위협도의 총합을 최대화하는 것이다. 이를 위해 매 스케줄링시 모든 교전계획에 대해 결정

변수 x_{ijk}^t 와 실제 교전 진행여부인 파라미터 O_{ijk}^t 를 활용하여, 전체 교전시간 $t \in T(\bar{s})$ 에서 각 표적이 레이더 채널 및 무기가 할당되었음에도 격추되지 않을 확률을 계산한다. 예를 들어 스케줄링 시점 \bar{s} 에서의 목적함수는 진행 중인 교전 ($O_{ijk}^t = 1, \forall i, j, k, t \leq \bar{s}$)과 스케줄링 시점 \bar{s} 이후의 교전 계획($x_{ijk}^t = 1, \forall i, j, k, \bar{s} < t$)으로 이루어진다.

제약조건 식 (5)는 스케줄링 시점 \bar{s} 에서 할당 가능한 무기의 총 수량을 제한하는 것이며, 식 (6)은 스케줄링 시점 \bar{s} 이전의 교전계획은 변경하지 않도록 하는 것이며, 식 (7)은 스케줄링 시점 \bar{s} 이후의 시간 t 에서 하나의 무기는 최대 한번만 할당되도록 제한하는 것이다.

식 (8)과 식 (9)는 레이더 채널의 동시교전능력과 무기의 교전능력에 제한이 있음을 보여준다. 식 (8)은 시간 t' ($t' \leq t$)에서 무기가 발사되면 일정한 재장전(Weapon Setting) 시간이 경과하기 전 ($t' \geq t - R_j$)에는 시간 t 에서 무기 발사가 이루어지지 않도록 하는 것이다. 식 (9)는 레이더 채널의 동시교전능력을 제한하는 것으로, 시간 t' ($t' \leq t$)에서 진행 중인 교전이 종료되기 전 ($t' \geq t - F_{jk}$)에는 시간 t 에서 해당 레이더 채널에 신규 교전이 발생하지 않도록 하는 것이다. 위의 제약조건 식은 무기가 표적과 교전시 발생하는 물리적인 제한사항과 진행 중인 교전이 종료된 이후의 교전계획이 변경되는 상황을 고려하기 위하여 설정하였다.

- 파라미터 업데이트

스케줄링이 수행될 때 기결정된 교전계획의 변경여부, 표적 격추여부를 결정한다. 먼저 스케줄링이 반복될 때마다 혼합정수 계획법으로 수리모형의 해를 구한 후 교전계획과 관련된 파라미터를 아래와 같이 업데이트한다. 식 (10)은 스케줄링 시점 \bar{s} 에서 결정된 교전계획 중 다음 스케줄링 시점 $\bar{s}+1$ 이 포함된 교전계획이 있으면 파라미터를 업데이트하는 것이다. 이에 따라 식 (11)에서는 다음 스케줄링 시점 $\bar{s}+1$ 에서 할당 가능한 무기 수량이 업데이트된다.

$$O_{ijk}^{\bar{s}+1} = 1 \text{ if } x_{ijk}^{\bar{s}+1} = 1 \quad \forall i, j, k \quad (10)$$

$$c_j^{\bar{s}+1} = c_j^{\bar{s}} - \sum_{i,k} x_{ijk}^{\bar{s}+1} \quad \forall j \quad (11)$$

다음은 교전계획에 따라 발사된 무기가 표적까지 비행한 후 교전결과를 결정한다. 식 (12)는 진행 중인 교전 중 시점 $\bar{s}+1$ 에 종료되는 교전이 있으면 균일분포 $U(0, 1)$ 에 따른 난수를 생성하는 것이다. 식 (13)은 생성된 난수와 해당 교전의 격추 확률을 비교하여 표적 격추여부를 결정한 뒤 관련된 파라미터를 업데이트하는 것이다.

$$\text{Generate } R.N \sim U(0,1) \text{ if } O_{ijk}^{\bar{s}+1} = 1, t + F_{jk}^t = \bar{s} + 1 \quad (12)$$

$$\text{if } R.N \geq P_{jk}^t \text{ then } v_k^{\bar{s}} = 0 \text{ (격추성공)}, \quad (13)$$

$$O_{ijk}^t = 0 \quad \forall i, j, k, t$$

$$\text{if } R.N < P_{jk}^t \text{ then } v_k^{\bar{s}+1} = v_k^{\bar{s}} \text{ (격추실패)},$$

$$O_{ijk}^t = 0 \quad \forall i, j, k, t$$

다중구간-사건기반 스케줄링 알고리즘(ESAM) 수행절차는 아래의 pseudo code와 같다.

```

Initialize target scenario
For s in S
  For k in K
    Update target trajectory(location, speed)
    Evaluate threat value( $v_k^s$ )
  End For
  Start scheduling by ESAM
  For i in I & j in J & k in K
    if  $x_{ijk}^{s+1} = 1$  then
       $O_{ijk}^{s+1} = 1$ 
       $c_j^{s+1} = c_j^s - 1$ 
    End if
  End For
  For i in I & j in J & k in K & t in T
    if  $O_{ijk}^t = 1, t + F_{jk}^t = s + 1$  then
      Generate  $R.N \sim U(0, 1)$ 
      if  $R.N \geq P_{jk}^t$  then
         $v_k^s = 0$ 
      Else
         $v_k^{s+1} = v_k^s$ 
      End if
       $O_{ijk}^t = 0$ 
    End if
  End For
End For
Calculate total threat value and number of survived target
    
```

(2) 다중구간-시간기반 스케줄링 알고리즘(TSAM)

스케줄링 알고리즘을 이용한 두 번째 수리모형은 앞서 제안한 다중구간-사건기반 스케줄링 알고리즘을 수정한 것으로 다중구간-시간기반 스케줄링 알고리즘(TSAM : Time-triggered Scheduling Algorithm with Multi-period)으로 명명한다. 다중구간-사건기반 알고리즘과 가장 큰 차이는 무기가 발사되어 진행 중인 교전 취소가 가능하며, 스케줄링이 매 교전 종료 후가 아닌 일정한 시간주기마다 반복 수행되는 것이다. 이를 위해 다음과 같이 관련 결정변수, 파라미터, 목적함수, 제약식을 수정하였다. 스케줄링 시점 $s = \bar{s}$ 에서 스케줄링을 통해 교전계획을 작성하는 다중구간-시간기반 스케줄링 알고리즘(TSAM) 수리모형은 아래와 같다.

• 결정변수

x_{ijk}^t : 시간 t 에서 시작되는 교전계획에 레이더 채널 i 와 무기 j 가 표적 k 에 할당되면 1, 아니면 0

y_i : 레이더 채널 i 가 할당된 기존 교전을 진행하면 1, 취소하면 0

• 목적함수

$$\max \sum_k v_k^s \times [1 - \prod_{i,j,t} (1 - P_{jk}^t)^{(x_{ijk}^t + O_{ijk}^t \times y_i)}] \quad (14)$$

• 제약조건

$$\sum_{i,t,k} x_{ijk}^t \leq c_j^{\bar{s}} \quad \forall j \quad (15)$$

$$\sum_{i,j,k} \sum_{t \leq \bar{s}} x_{ijk}^t = 0 \quad (16)$$

$$\sum_{j,k} x_{ijk}^t \leq 1, \quad \forall i, \quad \bar{s} < t \quad (17)$$

$$\sum_{i,k} x_{ijk}^t \leq 1 - \sum_{i,k} \sum_{t' \geq t - R_j}^{t' \leq t} (x_{ijk}^{t'} + O_{ijk}^{t'} \times y_i) \quad \forall j, t \quad (18)$$

$$\sum_{j,k} x_{ijk}^t \leq 1 - \sum_{j,k} \sum_{t' \geq t - F_{jk}^t}^{t' \leq t} (x_{ijk}^{t'} + O_{ijk}^{t'} \times y_i) \quad \forall i, t \quad (19)$$

목적함수 식 (14)는 모든 교전종료 후 파괴한 표적 위협도의 총합을 최대화하는 것으로 다중구간-사건기반 스케줄링 알고리즘(ESAM)의 목적함수 식 (4)와 동일하게 매 스케줄링시 모든 교전계획에 대해 결정변수 x_{ijk}^t 와 실제 교전 진행여부인 파라미터 O_{ijk}^t 를 활용하나, 진행 중인 교전 취소와 관련된 결정변수 y_i 를 목적함수에 추가로 반영하였다.

제약조건 식 (15)는 스케줄링 시점 \bar{s} 에서 할당 가능한 무기의 총 수량을 제한하는 것이며, 식 (16)은 스케줄링 시점 \bar{s} 이전의 교전계획은 변경하지 않도록 하는 것이며, 식 (17)은 스케줄링 시점 \bar{s} 이후의 시간 t 에서 하나의 무기는 최대 한번만 할당되도록 제한하는 것이다.

식 (18)과 식 (19)는 레이더 채널의 동시교전능력과 무기의 교전능력에 제한이 있음을 보여주는 것으로 다중구간-사건기반 스케줄링 알고리즘(ESAM)의 제약조건 식 (8)과 식 (9)와 의미는 동일하나, 진행 중인 교전 취소와 관련된 결정변수 y_i 를 추가로 반영하였다.

위의 제약조건 식은 무기가 표적과 교전시 발생하는 물리적인 제한사항과 스케줄링이 반복되며 진행 중인 교전을 취소하거나 교전계획을 변경하는 상황을 고려하기 위하여 설정하였다.

• 파라미터 업데이트

스케줄링이 수행될 때 진행 중인 교전 취소 또는 기결정된 교전계획의 변경여부, 표적 격추여부를 결정한다. 먼저 스케줄링이 반복될 때마다 혼합정수계획법으로 수리모형의 해를 구한 후 교전계획과 관련된 파라미터를 아래와 같이 업데이트한다. 식 (20)은 스케줄링 시점 $s = \bar{s}$ 에서 결정된 교전계획 중 다음 스케줄링 시점 $\bar{s}+1$ 이 포함된 교전계획이 있으면 파라미터를 업데이트하는 것이다. 이에 따라 식 (21)에서는 다음 스케줄링 시점 $\bar{s}+1$ 에서 할당 가능한 무기 수량이 업데이트된다. 식 (22)는 스케줄링시 진행 중인 교전이 취소되면 파라미터를 업데이트 하는 것이다.

$$O_{ijk}^{\bar{s}+1} = 1 \text{ if } x_{ijk}^{\bar{s}+1} = 1 \quad \forall i, j, k \quad (20)$$

$$c_j^{\bar{s}+1} = c_j^{\bar{s}} - \sum_{i,k} x_{ijk}^{\bar{s}+1} \quad \forall j \quad (21)$$

$$O_{ijk}^t = 0 \text{ if } y_i = 0 \quad \forall i, j, k, t \leq \bar{s} \quad (22)$$

다음은 교전계획에 따라 발사된 무기가 표적까지 비행한 후 교전결과를 결정한다. 식 (23)은 진행 중인 교전 중에서 시점 $s+1$ 에 종료되는 교전이 있으면 균일분포 $U(0, 1)$ 에 따른

난수를 생성하는 것이다. 식 (24)는 생성된 난수와 해당 교전의 격추확률을 비교하여 표적 격추여부를 결정한 뒤 관련된 파라미터를 업데이트하는 것이다.

$$\text{Generate } R.N \sim U(0,1) \text{ if } O_{ijk}^{s+1} = 1, t + F_{jk}^t = \bar{s} + 1 \quad (23)$$

$$\text{if } R.N \geq P_{jk}^t \text{ then } v_k^{\bar{s}} = 0 \text{ (격추성공),} \quad (24)$$

$$O_{ijk}^t = 0, \forall i, j, k, t$$

$$\text{if } R.N < P_{jk}^t \text{ then } v_k^{s+1} = v_k^{\bar{s}} \text{ (격추실패),}$$

$$O_{ijk}^t = 0 \quad \forall i, j, k, t$$

다중구간-시간기반 스케줄링 알고리즘(TSAM) 수행절차는 아래의 pseudo code와 같다.

```

Initialize target scenario
For s in S
  For k in K
    Update target trajectory(location, speed)
    Evaluate threat value( $v_k^s$ )
  End For
  Start scheduling by TSAM
  For i in I & j in J & k in K
    if  $x_{ijk}^{s+1} = 1$  then
       $O_{ijk}^{s+1} = 1$ 
       $c_j^{s+1} = c_j^s - 1$ 
    End if
    if  $y_i = 0$  then
       $O_{ijk}^t = 0$ 
    End if
  End For
  For i in I & j in J & k in K & t in T
    if  $O_{ijk}^t = 1, t + F_{jk}^t = s + 1$  then
      Generate  $R.N \sim U(0,1)$ 
      if  $R.N \geq P_{jk}^t$  then
         $v_k^s = 0$ 
      Else
         $v_k^{s+1} = v_k^s$ 
      End if
       $O_{ijk}^t = 0$ 
    End if
  End For
End For
Calculate total threat value and number of survived target

```

3.3 벤치마크 알고리즘(Shoot-Look-Shoot Algorithm)

본 논문에서 제안하는 다중구간-사건기반 스케줄링 알고리즘과 다중구간-시간기반 스케줄링 알고리즘에 대한 벤치마크 알고리즘으로 Shoot-Look-Shoot(발사-격추확인-발사) 알고리즘을 선정하였다. Shoot-Look-Shoot 알고리즘은 위협평가 후 위협우선순위에 따라 교전계획을 수립 및 시행한다(Lee, 2016). 대부분의 동적 무기-표적 할당문제 연구에서 최대 교전효과 달성 및 교전에 소모된 무기수량을 최소화하는 비용절감의 절충안으로 Shoot-Look-Shoot 알고리즘이 채택된 점을 고려하여 본 논문의 벤치마크 알고리즘으로 선정하였다. Shoot-Look-Shoot

알고리즘은 본 논문에서 제안하는 다중구간-사건기반 스케줄링 알고리즘과 동일하게 매 교전 종료 후 스케줄링을 반복 수행한다. 교전결과를 반영한 위협평가 후 기존 표적에 무기 재할당 또는 다른 표적에 무기를 신규 할당하여 교전을 수행한다. 다만 Shoot-Look-Shoot 알고리즘은 스케줄링시 일정한 미래구간에 대한 교전상황을 고려하는 다중구간-사건기반 알고리즘, 다중구간-시간기반 알고리즘과 달리, 현시점 기준으로 가장 큰 교전효과가 예상되는 교전계획을 작성 및 수행한다. 이에 따라 교전계획 확보를 위해 조기 교전이 발생하며, 이에 따른 무기 소비가 초반에 집중되는 경향을 보일 수 있다. 스케줄링 시점 $s = \bar{s}$ 에서 교전계획을 결정하기 위한 Shoot-Look-Shoot 알고리즘 수리모형은 아래와 같다.

• 결정변수

x_{ijk}^t : 시간 t 에서 시작되는 교전계획에 레이더 채널 i 와 무기 j 가 표적 k 에 할당되면 1, 아니면 0

• 목적함수

$$\max \sum_k v_k^{\bar{s}} \times [1 - \prod_{i,j,t \leq \bar{s}} (1 - P_{jk}^{s+1})^{(x_{ijk}^{s+1} + O_{ijk}^t)}] \quad (25)$$

• 제약조건

$$\sum_i \sum_j \sum_{t \leq s} (x_{ijk}^{s+1} + O_{ijk}^t) \leq 1 \quad \forall k \quad (26)$$

목적함수 식 (25)는 무기를 표적에 할당 및 교전을 수행하고, 모든 교전종료 후 파괴한 표적의 위협도 총합을 최대화하는 것으로, 앞서 제시된 두 스케줄링 알고리즘의 목적함수와 의미는 동일하다. 제약조건 식 (26)은 스케줄링 시점 \bar{s} 에 결정되어 특정 표적과 진행 중인 교전이 스케줄링 시점 $\bar{s} + 1$ 에도 진행될 경우 해당 표적에 대한 신규 교전계획이 추가로 작성될 수 없다는 것이다.

Shoot-Look-Shoot 알고리즘 수행절차는 다음의 pseudo code와 같다.

```

Initialize target scenario
For s in S
  For k in K
    Update target trajectory(location, speed)
    Evaluate threat value( $v_k^s$ )
  End For
  Start scheduling by Shoot-Look-Shoot
  For i in I & j in J & k in K & t in T
    if  $O_{ijk}^t = 1, t + F_{jk}^t = s + 1$  then
      Generate  $R.N \sim U[0,1]$ 
      if  $R.N \geq P_{jk}^t$  then
         $v_k^s = 0$ 
      Else
         $v_k^{s+1} = v_k^s$ 
      End If
       $O_{ijk}^t = 0$ 
    End if
  End For
End For
Calculate total threat value and number of survived target

```

4. 실험 및 결과 분석

4.1 실험 전장환경 설정 및 시나리오 구성

본 연구에서 제안하는 스케줄링 알고리즘과 벤치마크 알고리즘 수리모형에 대하여 ILOG CPLEX 12.6과 Java Eclipse IDE 4.10을 통해 실험을 수행하였다. 실험에서 <Figure 4>와 같이 표적 이동과 교전이 이루어지는 전장공간을 124×124 크기의 2차원 Cell로 가상화하였으며, 일반적인 방공무기 운용개념과 사례 등을 고려하여 가상 전장공간에 방어대상이 되는 6개의 방어자산과 1개의 포대를 배치하였다. 포대는 무기(미사일)가 탑재된 발사대 4대(각 8발, 총 32발)와 표적을 탐지하고 무기를 유도하는 레이더 1대로 구성하였다. 또한 표적이 스케줄링 대상에 포함되는 기준인 위협거리를 60km, 무기의 최대 교전거리는 발사대로부터 40km로 설정하였다. 한편 무기의 격추확률은 무기-표적 거리별로 사전 정의되고 표적 종류와 속도 등과는 무관한 것으로 설정하였다. 무기가 발사된 교전을 취소하고, 새로운 교전을 시작할 경우 임무 재할당에 단위시간 2만큼 소요되는 것으로 설정하였다. 그리고 매 스케줄링마다 계산시간은 최대 단위시간 60을 초과하지 않으며, 분기한정법(Branch and Bound)을 통해 탐색된 정수해와 하한값(Lower Bound)의 차이가 5% 이내에 존재할 경우 해당 스케줄링이 종료되도록 설정하였다. 이때 단위시간은 앞서 제시한 교전구간 $[0, 1, \dots, \bar{s} + SP(\text{스케줄링 구간})]$ 의 시간간격을 기준으로 한다.

전장공간에서는 총 16대의 표적이 2대씩 편대를 구성하고, 경유지점 2개가 포함된 경로를 따라 동일한 방어자산을 공격한다. 이때 방어자산의 가치(중요도)에 따라 1개 또는 2개 편대가 공격을 위해 접근한다. 이때 표적은 <Table 1>과 같이 2대씩 동일한 속도와 경로로 이동하지만, 안전거리 유지를 위해 진입시간을 분리하여 출발한다. 이는 실제 항공작전시 임무를 수행하는 항공기와 다른 항공기 간 공중충돌 방지를 위하여 수직 및 수평 공간을 분리하는 개념을 고려한 것이다(Noh *et al.*, 2018). 표적은 왼쪽부터 시계방향으로 1번부터 16번을 부여하였다.

무기는 <Table 2>와 같이 총 4개 발사대와 32발의 무기를 보유하며, 무기 속도와 재장전 소요시간은 동일하게 설정하고, 발사대는 왼쪽부터 시계방향으로 1번부터 4번을 부여하였으며, 레이더의 동시교전능력(주파수 채널 수)은 3개로 설정하였다.

Table 1. Approach speed and Entry time of Target

Number	Approach Speed	Entry Time	Number	Approach Speed	Entry Time
Target 1	0.93km/Time-Unit	0	Target 9	1.23km/Time-Unit	3
Target 2		1	Target 10		3.67
Target 3	1.02km/Time-Unit	2	Target 11	1.23km/Time-Unit	4.33
Target 4		3	Target 12		5
Target 5	0.96km/Time-Unit	1.67	Target 13	1.11km/Time-Unit	3.33
Target 6		2.67	Target 14		4.33
Target 7	1.17km/Time-Unit	3.67	Target 15	1.2km/Time-Unit	4
Target 8		4.67	Target 16		4.67

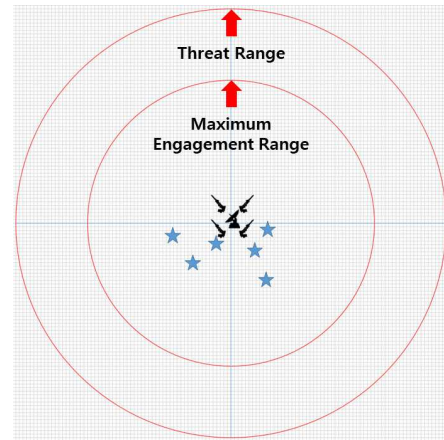


Figure 4. Experimental Battlefield

Table 2. Properties of Weapon(Missile) and Radar

	Launcher 1	Launcher 2	Launcher 3	Launcher 4
Speed	9km/Time-Unit			
Reload Time	2 Time-Unit			
Quantity	8 missiles	8 missiles	8 missiles	8 missiles
Simultaneous Engagement	Maximum 3 missiles			

표적의 공격목표인 방어자산의 가치는 <Table 3>과 같이 1부터 5까지 차이를 두고, 중요한 방어자산일수록 전장공간 중앙 근처로 배치하였고, 중앙 왼쪽부터 1번부터 6번을 부여하였다.

Table 3. Value of Defended Asset

	Asset 1	Asset 2	Asset 3	Asset 4	Asset 5	Asset 6
Value of Asset	1	3	5	5	4	2

또한 <Figure 5>와 같이 무기와 표적간 거리가 가까워지면 격추확률이 점점 증가하고, 최소 교전거리 이내에서 급격하게 격추확률이 감소하는 일반적인 무기 특성 및 Nam *et al.*(2000)의 연구 등을 고려하여 무기-표적 거리별 격추확률을 부여하였다.

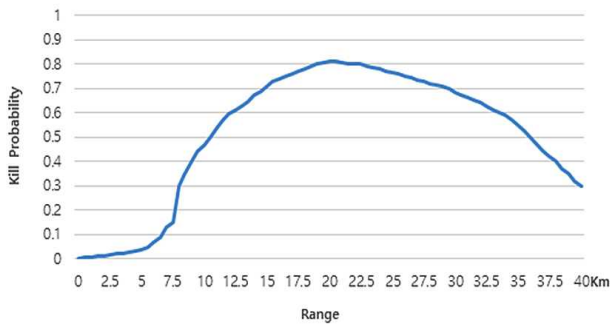


Figure 5. Kill Probability by Weapon-Target Range

본 실험에서는 전장공간 <Figure 4>에서 표적의 접근 방향과 경로 복잡도에 따라 총 6가지 표적 시나리오를 설정한다. 시나리오 1은 <Figure 6(a)>와 같이 표적이 90° 내의 범위에서 단방향으로 접근한다. 시나리오 2는 <Figure 6(b)>와 같이 표적이 180° 반원방향에서 접근한다. 시나리오 3은 <Figure 6(c)>와 같이 표적이 360° 전방향에서 접근한다. 위의 3가지 시나리오에서는 표적의 접근경로를 상대적으로 단순하고 직선에 가깝게 설정하였다. 시나리오 4, 시나리오 5, 시나리오 6은 각각 <Figure 6(d)>, <Figure 6(e)>, <Figure 6(f)>와 같이 시나리오 1, 시나리오 2, 시나리오 3에서 표적의 출발위치와 출발시간, 공격목표(방어자산) 등은 모두 동일하지만, 공격목표를 추정하기 어렵도록 접근 경로를 복잡하게 설정하였다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 시간이 경과하며 표적이 실제 공격목표에 인접했을 때 위협도 계산 성능이 향상되는 특성을 고려한 것으로, 복잡한 표적경로에서

스케줄링 알고리즘의 효용성을 검증하기 위함이다.

또한 본 논문에서는 제안하는 스케줄링 알고리즘(Shoot-Look-Shoot 알고리즘 제외) 설정에 따른 성능검증을 위하여 스케줄링시 반영되는 미래시점인 스케줄링 구간을 달리하면서 실험을 수행하였다. 이때 스케줄링 구간은 단위시간 20, 단위시간 10, 단위시간 5로 설정하였는데, 표적 시나리오에서 경유지점 간 직선거리 이동시간이 단위시간 10 내외 정도로 소요되는 점을 고려하였다.

정리하면 6개 표적 시나리오에 대하여 위협평가 방법(최소 근접거리 우선, 평균 근접거리 우선, 최대 접근속도 우선), 무기-표적 할당 알고리즘(다중구간-사건기반 스케줄링, 다중구간-시간기반 스케줄링, Shoot-Look-Shoot), 스케줄링 알고리즘 설정(스케줄링 구간 단위시간 20, 10, 5)을 적용하여 실험을 수행하였다. 시나리오별로 100번씩 반복 실험을 수행하고, 모든 교전이 종료된 후에 생존한 표적의 대수와 표적의 위협도 총합을 평균값으로 계산하여 분석하였다. 또한 무기-표적 할당 알고리즘과 시나리오별로 모든 스케줄링이 완료되기까지 소요된 총 계산시간을 총 스케줄링 횟수로 나눈 평균값으로 계산하여 분석하였다. 이는 각 시나리오별로 표적의 궤적이 달라 모든 교전 종료시까지 전체 교전시간과 스케줄링 수행 횟수가 다르므로, 스케줄링 1회에 소요되는 평균 계산시간을 비교하기 위함이다. 또한 Shoot-Look-Shoot 알고리즘은 교전계획이 1회만 작성되나, 스케줄링 알고리즘은 교전계획이 여러 번 작성된다. 따라서 이러한 알고리즘 특성을 고려하여 각 알고리즘에서 스케줄링 1회에 소요된 평균 계산시간을 비교하였다.

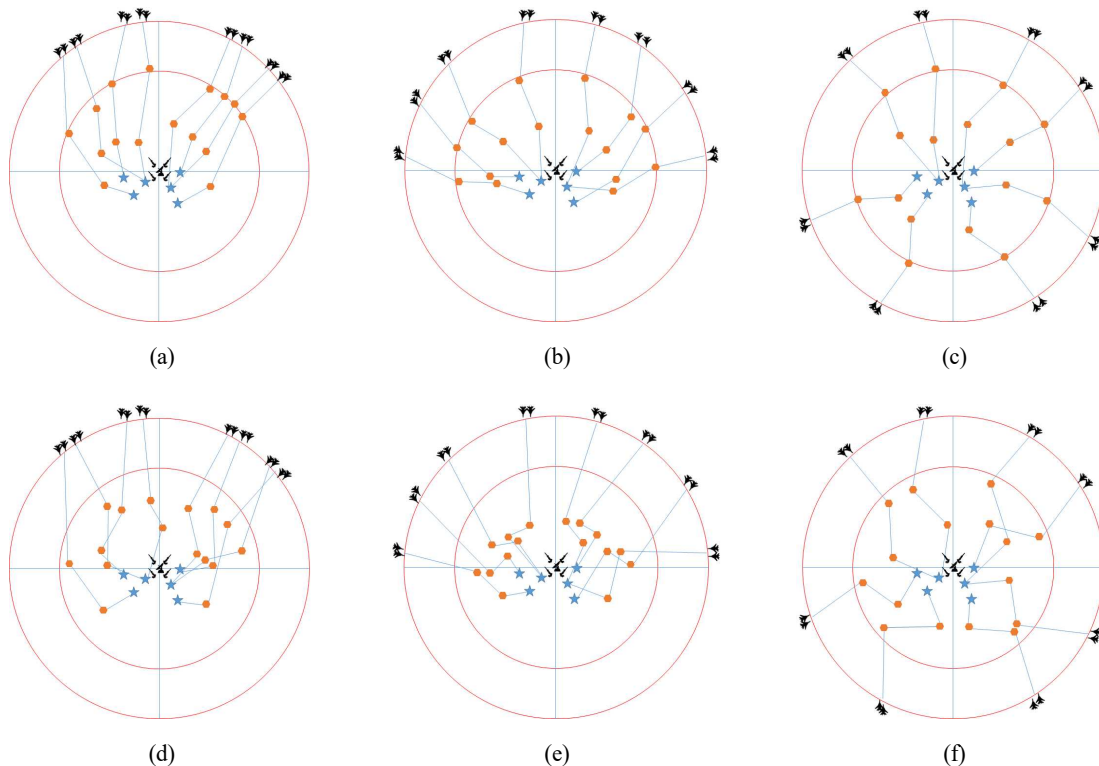


Figure 6. Target Scenarios

4.2 실험 결과

<Table 4>는 다중구간-사건기반 스케줄링 알고리즘과 다중구간-시간기반 스케줄링 알고리즘, Shoot-Look-Shoot 알고리즘별 3가지 위협평가 방법론을 적용한 실험 결과이다.

<Table 5>는 다중구간-사건기반 스케줄링 알고리즘에 대해 스케줄링 구간을 3가지(단위시간 20, 10, 5)로 적용한 실험 결과이다.

4.3 결과 분석

<Table 4>에서는 본 논문에서 제안하는 다중구간-사건기반 스케줄링 알고리즘과 다중구간-시간기반 스케줄링 알고리즘, Shoot-Look-Shoot 알고리즘간 성능검증을 위해 시나리오별 생존 표적 대수, 생존표적 가치, 계산시간 평균값을 비교 분석하였다.

먼저 다중구간-사건기반 스케줄링 알고리즘(스케줄링 구간 단위시간 20)은 Shoot-Look-shoot 알고리즘에 비해 최소 동일~ 최대 30배 좋은 해를 도출하는 경향을 보였다. 단, 시나리오 1에서 위협평가를 최대 접근속도 우선 방법으로 실시한 경우에만 근소하지만 Shoot-Look-Shoot 알고리즘이 더 좋은 해를 도출하였다.

이는 동일한 표적에 여러 무기가 할당될 수 있는 제안 알고리즘과 달리 Shoot-Look-Shoot 알고리즘이 표적 격추결과를 확인하고 다시 교전하기 때문에 상대적으로 제한된 교전기회를 가지며, 미래 시점의 상황을 반영하지 않고 현시점에서 격추효과를 최대로 하는 무기-표적 할당을 선택하는 특성에 기반한다고 볼 수 있다. 또한 다중구간-사건기반 스케줄링 알고리즘이 다중구간-시간기반 스케줄링 알고리즘 대비 시나리오와 위협평가 방법에 상관없이 최소 9배~최대 93배 좋은 해를 도출하는 경향을 보였다. 이는 다중구간-사건기반 알고리즘과 달리 다중구간-시간기반 알고리즘은 무기가 발사된 교전을 취소하여 무기 손실과 이에 따른 교전이 이루어지지 않는 상황이 빈번하게 발생하기 때문으로 볼 수 있다. 그리고 제안하는 다중구간-사건기반 스케줄링 알고리즘과 Shoot-Look-Shoot 알고리즘 모두 표적 접근 패턴이 복잡한 경우 단순한 접근 패턴에 비해 대체적으로 좋은 해를 도출하는 경향도 확인할 수 있다. 이는 표적이 복잡한 경로에서 실제 공격목표에 접근할 때 위협도가 정확해지는 위협평가 방법의 특성과 미래시점을 고려하는 알고리즘의 특성에 기반하는 것으로 볼 수 있다. 위와 같이 스케줄링 알고리즘과 벤치마크 알고리즘의 성능비교를 통해 다중구간-사건기반 스케줄링 알고리즘의 실효성을 확인할 수 있다.

Table 4. Experiment results by Algorithm(100 times average)

Method of Target Evaluation	ESAM (Proposed Algorithm 1)			TSAM (Proposed Algorithm 2)			Shoot-Look-Shoot (Benchmark Algorithm)		
	Number of Survived Target	Value of Survived Target	AVG CPU Time (sec)	Number of Survived Target	Value of Survived Target	AVG CPU Time (sec)	Number of Survived Target	Value of Survived Target	AVG CPU Time (sec)
Scenario 1(Direction 90°, Simple Trajectory)									
Minimum Closest Point of Approach	0.02	0.05	1.50	1.49	3.01	1.48	0.26	0.52	0.01
AVG Closest Point of Approach	0.03	0.11	1.75	0.94	2.21	1.92	0.36	0.78	0.01
Maximum Approach Speed	0.06	0.10	1.54	1.99	5.05	1.58	0.04	0.18	0.01
Scenario 2(Direction 180°, Simple Trajectory)									
Minimum Closest Point of Approach	0.27	0.36	1.61	2.23	3.64	1.81	2.40	3.29	0.01
AVG Closest Point of Approach	0.12	0.26	1.96	1.33	5.72	2.37	2.51	3.61	0.01
Maximum Approach Speed	0.25	0.70	1.77	2.00	8.68	1.76	1.73	1.82	0.01
Scenario 3(Direction 360°, Simple Trajectory)									
Minimum Closest Point of Approach	0.42	0.70	1.76	1.95	3.82	2.42	2.67	5.28	0.01
AVG Closest Point of Approach	0.08	0.29	1.96	1.18	5.39	2.41	2.39	4.27	0.01
Maximum Approach Speed	0.13	0.52	1.50	4.52	21.54	1.79	0.52	1.38	0.01
Scenario 4(Direction 90°, Complex Trajectory)									
Minimum Closest Point of Approach	0.02	0.05	1.43	2.37	4.75	1.60	0.08	0.15	0.01
AVG Closest Point of Approach	0.01	0.04	1.55	0.91	2.37	1.74	0.05	0.10	0.01
Maximum Approach Speed	0.03	0.09	1.50	2.93	8.90	1.48	0.07	0.33	0.01
Scenario 5(Direction 180°, Complex Trajectory)									
Minimum Closest Point of Approach	0.12	0.18	0.67	2.11	3.38	0.85	1.35	1.36	0.01
AVG Closest Point of Approach	0.06	0.12	0.81	0.58	1.85	0.88	1.34	1.34	0.01
Maximum Approach Speed	0.04	0.04	0.80	3.35	10.97	0.80	0.30	0.52	0.01
Scenario 6(Direction 360°, Complex Trajectory)									
Minimum Closest Point of Approach	0.22	0.39	0.55	3.16	7.14	0.59	1.32	1.73	0.01
AVG Closest Point of Approach	0.16	0.54	0.56	0.93	4.03	0.59	1.27	1.37	0.01
Maximum Approach Speed	0.10	0.31	0.53	1.21	5.09	0.55	0.53	1.05	0.01

한편 <Table 5>에서는 제안하는 다중구간-사건기반 스케줄링 알고리즘의 스케줄링 구간 설정에 따른 성능을 비교 분석하였다. 시나리오와 상관없이 스케줄링 구간을 단위시간 20과 10으로 설정하였을 때 스케줄링 구간을 단위시간 5로 설정한 경우 대비 모두 좋은 해를 도출하였다. 이 중 스케줄링 구간을 단위시간 20으로 설정한 경우가 단위시간 10으로 설정한 경우와 대비하여 최소 동일~최대 10배 좋은 해를 도출하는 경향을 확인할 수 있다. 단 시나리오 4에서 위협평가를 최대 접근 속도 우선 방법으로 실시한 경우와 시나리오 5에서 위협평가를 평균 근접거리 우선 방법으로 실시한 경우에는 스케줄링 구간을 단위시간 10으로 설정한 스케줄링 알고리즘이 근소하지만 더 좋은 해를 도출하였다. 이는 동적 무기-표적 할당시 미래 상황을 고려하는 것이 의사결정에 도움이 되나, 상황에 따라서는 의사결정에 부정적으로 작용할 수 있음을 보여준다. 따라서 실제 방공작전에 스케줄링 알고리즘 적용시 최대 교전효과를 달성하기 위해 적절한 스케줄링 구간을 설정하는 것이 중요하다고 볼 수 있다.

한편, 급변하는 전장환경에 스케줄링 알고리즘을 적용하기 위하여 신속한 계산이 요구되며, 이러한 관점에서 알고리즘별

스케줄링 평균 계산시간을 분석하였다. 먼저 <Table 4>에서는 Shoot-Look-Shoot 알고리즘이 1회의 스케줄링에 시나리오와 상관없이 평균 0.01초(최소 0.01초, 최대 0.01초)가 소요되는 것을 확인할 수 있다. 제안하는 다중구간-사건기반 스케줄링 알고리즘의 경우 1회의 스케줄링에 평균 1.32초(최소 0.53초, 최대 1.96초)가 소요되며, 다중구간-시간기반 스케줄링 알고리즘은 평균 1.48초(최소 0.55초, 최대 2.42초)가 소요되었다. 벤치마크 알고리즘인 Shoot-Look-Shoot 알고리즘 대비 스케줄링 알고리즘의 계산시간이 많이 소요되지만, 이는 스케줄링시 미래시점의 상황을 고려하는 스케줄링 알고리즘의 특성에 기반하는 것이며, 실제 작전에서는 1초 내외의 스케줄 계산을 통해 더 큰 교전효과를 달성하는 의사결정을 추구하는 것이 합리적이라고 볼 수 있다. 또한 <Table 5>에서는 다중구간-사건기반 스케줄링 알고리즘의 스케줄링 구간을 변경하였을 때의 평균 스케줄링 계산시간을 확인할 수 있다. 스케줄링 구간을 단위시간 5에서 20으로 증가시킬 때 스케줄링 계산시간이 증가하는 것은 미래시점의 상황을 더 길게 고려하기 때문이라고 볼 수 있다.

위 분석결과를 종합하면 다중구간-사건기반 스케줄링 알고리즘이 Shoot-Look-Shoot 알고리즘과 대비하여 일반적으로

Table 5. Experiment Results ESAM by Schedule -Period(100 times average)

Method of Target Evaluation	ESAM								
	Scheduling Period = 20			Scheduling Period = 10			Scheduling Period = 5		
	Number of Survived Target	Value of Survived Target	AVG CPU Time (sec)	Number of Survived Target	Value of Survived Target	AVG CPU Time (sec)	Number of Survived Target	Value of Survived Target	AVG CPU Time (sec)
Scenario 1(Direction 90°, Simple Trajectory)									
Minimum Closest Point of Approach	0.02	0.05	1.50	0.16	0.37	0.76	0.78	1.94	0.48
AVG Closest Point of Approach	0.03	0.11	1.75	0.12	0.35	0.71	1.07	3.59	0.46
Maximum Approach Speed	0.06	0.10	1.54	0.20	0.51	0.73	0.77	2.29	0.39
Scenario 2(Direction 180°, Simple Trajectory)									
Minimum Closest Point of Approach	0.27	0.36	1.61	1.65	1.87	0.72	3.45	8.59	0.50
AVG Closest Point of Approach	0.12	0.26	1.96	1.24	1.77	0.83	2.67	6.71	0.51
Maximum Approach Speed	0.25	0.70	1.77	0.28	0.60	0.72	2.24	5.07	0.49
Scenario 3(Direction 360°, Simple Trajectory)									
Minimum Closest Point of Approach	0.42	0.70	1.76	0.72	1.02	0.79	2.92	6.47	0.98
AVG Closest Point of Approach	0.08	0.29	1.96	0.44	0.76	0.76	2.68	7.84	1.02
Maximum Approach Speed	0.13	0.52	1.50	0.22	0.72	0.71	1.52	4.10	1.00
Scenario 4(Direction 90°, Complex Trajectory)									
Minimum Closest Point of Approach	0.02	0.05	1.60	0.03	0.03	0.82	0.48	1.05	0.50
AVG Closest Point of Approach	0.01	0.04	1.87	0.01	0.01	0.78	0.93	2.88	0.55
Maximum Approach Speed	0.03	0.09	1.60	0.01	0.05	0.73	0.74	2.05	0.51
Scenario 5(Direction 180°, Complex Trajectory)									
Minimum Closest Point of Approach	0.12	0.18	1.43	0.14	0.14	0.67	1.08	1.37	0.55
AVG Closest Point of Approach	0.06	0.12	1.55	0.04	0.04	0.81	0.98	1.35	0.56
Maximum Approach Speed	0.04	0.04	1.50	0.05	0.1	0.80	0.9	1.11	0.53
Scenario 6(Direction 360°, Complex Trajectory)									
Minimum Closest Point of Approach	0.22	0.39	1.63	1.06	1.16	0.92	2.61	7.86	0.60
AVG Closest Point of Approach	0.16	0.54	1.38	0.44	0.58	0.84	2.32	5.87	0.60
Maximum Approach Speed	0.1	0.31	1.46	0.7	0.84	0.91	1.84	5.01	0.56

스케줄링 계산시간이 좀 더 길지만, 합리적인 계산시간 내에서 파괴한 표적의 위협도 총합을 최대로 하는 좋은 해를 도출함을 확인할 수 있었다. 또한 다중구간-사건기반 스케줄링 알고리즘은 실험에 활용된 다양한 위협평가 방법과 상관없이 다른 알고리즘에 비해 일정하게 좋은 해를 도출함을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

본 논문에서는 아군의 방어자산에 위협이 되는 표적에 대응하기 위해 동적으로 무기를 할당하고, 교전계획을 작성하는 휴리스틱 기반의 Rolling-Horizon 스케줄링 알고리즘을 제안하였다. 제안된 스케줄링 알고리즘은 지속적으로 변하는 표적의 궤적과 격추결과를 실시간으로 반영하여 무기-표적 할당 및 최적의 교전계획을 작성하기 위한 제약조건과 파라미터 업데이트 과정 등을 포함하였다. 본 수리모형에 위협평가 방법, 표적 이동경로, 스케줄링 알고리즘 설정 등을 바꾸어 가며 실험한 결과 실제 교전결과에 따른 무기-표적 할당 및 교전계획이 실시간으로 변하는 것을 보여주었다. 한편 본 논문에서는 다중구간-사건기반 스케줄링 알고리즘과 다중구간-시간기반 스케줄링 알고리즘 두 가지를 제안하였으며, 이중 다중구간-사건기반 스케줄링 알고리즘이 무기-표적 할당문제에서 일반적으로 사용되는 기존의 Shoot-Look-Shoot 알고리즘과 비교하였을 때 보다 우수한 해를 도출할 수 있었다. 급격하게 변화하는 방공작전 상황에서는 신속한 의사결정이 요구되는데, 다중구간-사건기반 스케줄링 알고리즘은 표적경로 예측이 어려운 상황에서도 합리적이고 신속한 의사결정을 내리는데 활용할 수 있다고 판단된다.

그러나 제안된 다중구간-사건기반 스케줄링 알고리즘을 현장에서 보다 효과적으로 적용하기 위해 몇 가지 추가연구가 필요하다. 첫째, 스케줄링 알고리즘의 벤치마크 대상을 확대할 필요가 있다. 본 논문에서는 스케줄링 알고리즘과 무기-표적 할당문제에서 일반적으로 사용되는 Shoot-Look-Shoot 알고리즘 성능을 비교하였지만, 특정상황에서는 Shoot-Shoot-Look-Shoot 알고리즘, Shoot-Shoot-Shoot-Look 알고리즘, Shoot-Look-Shoot-Shoot 알고리즘과 같은 다양한 알고리즘 중에서 하나를 선택할 수도 있기 때문이다.

둘째, 향후 다양한 시나리오의 반복 실험을 통해, 스케줄링 알고리즘 성능을 충분히 보장할 수 있는 설정을 도출하는 연구가 필요하다. 본 논문에서는 위협평가 방법, 표적 이동경로, 스케줄링 알고리즘 설정 등을 다양화하여 시나리오를 설정하고 실험을 수행하였으나, 반드시 스케줄링 알고리즘의 성능이 우월하게 보장되는 것은 아니다. 이는 스케줄링 구간을 어떻게 설정하느냐에 따라 스케줄링 알고리즘의 성능이 달라질 수 있기 때문이다. 예를 들어, 스케줄링 구간을 짧게 설정할 경우 진행 중인 교전이 빈번하게 취소되고 무기가 조기에 소진되어 추가 교전이 제한되는 특정 상황에서는 비교대상인

Shoot-Look-Shoot 알고리즘보다 다소 부족한 성능을 보일 수도 있다.

본 수리모형은 추후 무인기 또는 탄도미사일 등과 같은 다양한 무기-표적 할당에도 적용될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 위의 한계점을 보완하여 추가 연구가 진행된다면 다수 무기-다수 표적이 존재하는 실제 전장의 동적 무기-표적 할당에 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- Blodgett, D. E., Gendreau, M., Guertin, F., Potvin, J. Y., and Séguin, R. (2003), A tabu search heuristic for resource management in naval warfare, *Journal of Heuristics*, **9**(2), 145-169.
- Bogdanowicz, Z. R. (2009), A new efficient algorithm for optimal assignment of smart weapons to targets, *Computers and Mathematics with Applications*, **58**(10), 1965-1969.
- Cha, Y. H. and Jeong, B. (2019), Exact Algorithm for the Weapon Target Assignment and Fire Scheduling Problem, *Journal of the Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, **42**(1), 143-150.
- Hong, D. H., Yoo, J. H., Shin, S. C., Kim, S. H., and Park, Y. W. (2011), A Treat Evaluation Method on the Air Track in Short Range Air Defense Systems, *Proc. Symposium of the Korean Institute of communications and Information Sciences*, 414-415.
- Hong, S. S., Han, M. M., Choi, J. H., and Mun, C. M. (2012), A Study of population Initialization Method to improve a Genetic Algorithm on the Weapon Target Allocation problem, *The Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, **22**(5), 540-548.
- Hosein, P. A. (1989), *A Class of Dynamic Nonlinear Resource Allocation Problems*, Massachusetts Inst of Tech Cambridge Lab For Information and Decision Systems, Ph.D. Dissertation.
- Jang, J. G., Kim, K., Choi, B. W., and Suh, J. J. (2015), A Linear Approximation Model for an Asset-based Weapon Target Assignment Problem, *Journal of the Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, **38**(3), 108-116.
- Johansson, F. (2010), *Evaluating the Performance of TEWA Systems*, Örebro universitet, Ph.D. Dissertation.
- Johansson, F. and Falkman, G. (2008), A Bayesian network approach to threat evaluation with application to an air defense scenario, *2008 11th International Conference on Information Fusion*, 1-7.
- Johansson, F. and Falkman, G. (2009), An empirical investigation of the static weapon-target allocation problem, *Proc. 3rd Skövde Workshop on Information Fusion Topics*, 63-67.
- Karasakal, O. (2004), *Optimal Air Defense Strategies for Naval Task Group*, The Middle East Technical University, Ph.D. Dissertation.
- Khosla, D. (2001), Hybrid genetic approach for the dynamic weapon-target allocation problem, *Proc. In Battlespace Digitization and Network-Centric Warfare*, **4396**, 244-259.
- Kim, J. E., Shin, J. H., and Cho, K. S. (2010), A Weapon Assignment Algorithm Using the Munkres Optimal Assignment Method, *The Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, **13**(1), 1-8.
- Kim, J. H., Kim, K., Choi, B. W., and Suh, J. J. (2017), An Application of Quantum-inspired Genetic Algorithm for Weapon Target Assignment Problem, *Journal of the Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, **40**(4), 260-267.

- Lee, D. R. (2016), *The Optimal Allocation and Engagement Scheduling of Interceptor Missiles for Ballistic Missile Defense*, University of Seoul, Ph.D. Dissertation.
- Lee, D. R. and Yang, J. H. (2015), A Study on the Allocation and Engagement Scheduling of Air Defense Missiles by Using Mixed Integer Programming, *Korean Management Science Review*, **32**(4), 109-133.
- Lee, H., Choi, B. J., Kim, C. O., Kim, J. S., and Kim, J. E. (2017), Threat evaluation of enemy air fighters via neural network-based Markov chain modeling, *Knowledge-Based Systems*, **116**, 49-57.
- Lee, J. B., (2009), A study on real time dynamic multi-weapon multi-target assignment algorithm, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Ph.D. Dissertation.
- Lee, Y. H. and Nam, S. E. (2000), A Study on Optimal Allocation of Short Surface-to-Air Missile, *Journal of the military operations research society of Korea*, **26**(1), 34-46.
- Lee, Z. J., Lee, C. Y., and Su, S. F. (2002b), An immunity-based ant colony optimization algorithm for solving weapon-target assignment problem, *Applied Soft Computing*, **2**(1), 39-47.
- Lee, Z. J., Su, S. F., and Lee, C. Y. (2002a), A genetic algorithm with domain knowledge for weapon-target assignment problems, *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, **25**(3), 287-295.
- Lloyd, S. P. and Witsenhausen, H. S. (1986), Weapons allocation is NP-Complete, *Proc. Conf. on Summer Computer Simulation Conference*, 1054-1058.
- Naeem, H. and Masood, A. (2010), An optimal dynamic threat evaluation and weapon scheduling technique, *Knowledge-Based Systems*, **23**(4), 337-342.
- Naeem, H., Masood, A., Hussain, M., and Khan, S. A. (2009), A Novel Two-Staged Decision Support based Threat Evaluation and Weapon Assignment Algorithm, Asset-based Dynamic Weapon Scheduling using Artificial Intelligence Techniques, *International Journal of Computer Science and Information Security*, **2**(1), 159-166.
- Noh, N. S., Uhm, H. S., and Lee, Y. H. (2018), A Study on Flight Resource Allocation Based on Space Separation and Speed, *Journal of the Korean Operations Research and Management Science Society*, **43**(3), 51-63.
- Rosenberger, J. M., Hwang, H. S., Pallerla, R. P., Yucel, A., Wilson, R. L., and Brungardt, E. G. (2005), The generalized weapon target assignment problem, Texas University At Arlington.
- Roux, J. N. and Van Vuuren, J. H. (2007), Threat evaluation and Weapon assignment decision support : A review of the state of the art, *ORiON*, **23**(2), 151-187.
- Wacholder, E. (1989), A neural network-based optimization algorithm for the static weapon-target assignment problem, *ORSA Journal on Computing*, **1**(4), 232-246.
- Yoon, M. H. (2018), A Weapon Assignment Algorithm for Rapid Reaction in Multi-Target and Multi-Weapon Environments, *The Journal of Korea Contents Association*, **18**(8), 118-126.
- Yoon, M. H., Park, J. H., and Yi, J. H. (2018), A Threat Assessment Algorithm for Multiple Ground Targets, *The Journal of Korea Contents Association*, **18**(7), 590-599.

저자소개

정신기 : 공군사관학교 전산학과에서 2008년 학사학위, 연세대학교 산업공학과에서 2020년 석사학위를 취득하고, 방위사업청에서 획득전문장교로 근무 중이다. 연구분야는 국방분야 최적화이다.

엄현섭 : 연세대학교 도시공학과에서 2015년 학사학위를 취득하고, 연세대학교 산업공학과 석·박사통합과정에 재학 중이다. 연구분야는 국방분야 최적화, Vehicle Routing, Logistics, OR이다.

이영훈 : 서울대학교 산업공학과에서 학사를 취득하고 미국 컬럼비아 대학교에서 산업공학 석사, 박사를 취득하였다. 1993년부터 1997년까지 삼성전자 반도체에서 근무하였으며, 1997년부터 연세대학교 산업공학과 교수로 재직하고 있으며 대한산업공학회 회장(21대)을 역임하였다. 연구분야는 Manufacturing system modeling and analysis, Supply chain and Logistics management, Service industry operation modeling and analysis이다.