



## 동적 무장할당 문제에서의 GRASP 알고리즘 연구

박국권<sup>1</sup>, 강태영<sup>2</sup>, 유창경<sup>3</sup>, 정영란<sup>4</sup>

### GRASP Algorithm for Dynamic Weapon-Target Assignment Problem

Kuk-Kwon Park<sup>1</sup>, Tae Young Kang<sup>2</sup>, Chang-Kyung Ryoo<sup>3</sup> and YoungRan Jung<sup>4</sup>

Inha University<sup>1,2,3</sup>, Agency for Defense Development<sup>4</sup>

#### ABSTRACT

The weapon-target assignment (WTA) problem is a matter of effectively allocating weapons to a number of threats. The WTA in a rapidly changing dynamic environment of engagement must take into account both of properties of the threat and the weapon and the effect of the previous decision. We propose a method of applying the Greedy Randomized Adaptive Search Procedure (GRASP) algorithm, a kind of meta-heuristic method, to derive optimal solution for a dynamic WTA problem. Firstly, we define a dynamic WTA problem and formulate a mathematical model for applying the algorithm. For the purpose of the assignment strategy, the objective function is defined and time-varying constraints are considered. The dynamic WTA problem is then solved by applying the GRASP algorithm. The optimal solution characteristics of the formalized dynamic WTA problem are analyzed through the simulation, and the algorithm performance is verified via the Monte-Carlo simulation.

#### 초 록

무장할당(Weapon-Target Assignment, WTA) 문제는 다수 위협과 다종의 무장을 효과적으로 할당하는 문제이다. 실제 급변하는 교전환경에서의 무장할당은 위협과 무장의 특성과 위협-무장 선정에 따른 영향성을 모두 고려해야한다. 본 논문에서는 동적 무장할당 문제에서의 최적해 도출을 위해 메타휴리스틱 방법의 일종인 Greedy Randomized Adaptive Search Procedure (GRASP) 알고리즘 적용 방안을 제안한다. 먼저 동적 무장할당 문제를 정의하고 알고리즘 적용을 위해 수학적 모델을 정식화한다. 무장할당 전략을 수립하기 위하여 목적함수를 정의하고 시간변화를 고려한 구속조건을 설정한다. 이를 바탕으로 GRASP 알고리즘을 동적 무장할당 문제에 적용한다. 교전 시뮬레이션을 통해 정식화한 무장할당 문제의 최적해 특성을 분석하며, Monte-Carlo 시뮬레이션을 통해 알고리즘 성능 검증을 수행한다.

**Key Words** : Weapon-Target Assignment(무장할당), Combinatorial Optimization(조합 최적화), Naval Engagement(해상 교전), Metaheuristic Method(메타휴리스틱 기법), Time Window(교전가능시간)

† Received : August 19, 2019    Revised : October 24, 2019    Accepted : October 31, 2019

<sup>1</sup> Graduate Student, <sup>2</sup> Graduate Student, <sup>3</sup> Professor, <sup>4</sup> Senior Researcher

<sup>3</sup> Corresponding author, E-mail : ckryoo@inha.ac.kr, ORCID 0000-0001-5099-5980

## I. 서 론

20세기 후반에 이르러 급격히 발달한 정밀과학 기술은 각국의 군 분야에 적용되어 주요 무장 체계를 발전시키고 있다. 공격 무장들은 다양한 방식의 기동과 Salvo Attack, Ripple Fire 등의 공격기법 연구를 통해 공격력을 증대시키고 있으며, 방어 체계의 대응은 점차 어려워지고 있다. 일반적으로 교전환경은 아군의 자산을 공격하는 적군(위협)과 이에 대응하는 아군의 방어무기(무장)로 구성되는데, 전투 효과를 극대화하기 위해 체계적으로 교전계획을 수립하는 것이 필요하다.

무장할당 문제는 전투 효과를 극대화하기 위해 교전 상황을 정식화한 후 위협-무장 할당 조합을 찾는 문제이다. 일반적으로 무장할당 문제는 시간가변요소의 고려 여부에 따라 정적 무장할당(Static WTA)과 동적 무장할당(Dynamic WTA)으로 구분된다[1]. 정적 무장할당은 모든 무장이 동시교전 가능하다고 가정하여 할당 시점에서의 교전환경만을 고려한 위협-무장 할당 조합을 산출한다. 동적 무장할당은 무장의 할당-발사-요격에 이르기까지 시간에 따른 위협의 변화와 무장의 특성을 고려하여 연속적인 위협-무장 조합과 교전계획을 제공한다. 동적 무장할당은 보다 현실적인 무장할당 문제를 다루고 있어 향상된 교전계획을 제공하지만, 교전환경 규모가 커질수록 정적 무장할당보다 복잡도가 증가한다.

무장할당 문제는 조합최적화 문제로서 NP-Complete 문제임이 증명되었으며[2], 대부분의 경우 빠른 시간 안에 최적해를 찾는 것은 불가능하다. 이러한 최적화 문제를 풀기 위한 다양한 방법들이 연구되어왔으나 [3,4], 고전적인 방법들은 문제의 크기에 따라 연산 복잡도가 지수적으로 증가하여 최적해를 찾기 위해 많은 시간을 필요로 한다.

최적화 문제에 있어 계산시간을 단축하기 위해 메타휴리스틱 기법을 사용하여 근사적으로 해를 찾는 방법들이 많이 연구되고 있다. Lee[5]는 Greedy Eugenics를 혼합하여 지역 최적화를 통해 자손의 질을 향상시킨 유전 알고리즘(Genetic Algorithm, GA)를 제시하였으며, Lee[6]는 강화와 다양화의 조화를 통한 성능 향상을 개미 군집 최적화(Ant Colony Optimization, ACO)에 적용하여 국부 최적해에 쉽게 빠지는 ACO의 단점을 개선하였다. Zeng[7]은 이산 입자 군집 최적화(Discrete Particle Swarm Optimization, DPSO)를 제안하여 효과적인 입자들의 갱신을 통해 PSO의 성능을 향상시켰다. Hong[8]은 NP-Complete 문제에 대해 GA, ACO, PSO 간의 성능 비교를 통해 시나리오 전반에서 ACO의 성능에 대한 우수성을 입증하였다. 이러한 알고리즘들은 무장할당 문제에 있어 좋은 성능을 보이지만, 대부분의 경우 위협과 무장의 특성이 정적이라는 가정 하에 시변하는 교전 상황을 고

려하지 않고 알고리즘 성능을 분석하였다. 따라서 이를 실제 전장환경에 적용하는 데에는 한계가 있다.

또한 최적화 문제를 혼합 정수 계획법(Mixed-Integer Linear Programming, MILP) 문제로 접근할 경우 비교적 빠른 시간 내에 최적화가 가능성이 알려져 있다[9]. MILP 문제는 비선형인 모든 목적함수와 제약조건을 선형화하고 일부 변수가 정수인 문제를 다루며 Simplex 기법, 분기한정법(Branch and Bound), CPLEX 솔버 등을 활용할 수 있다. 이를 바탕으로 비선형 조합최적화 문제를 MILP로 변형하여 최적해를 찾는 기법들이 많이 연구되고 있다. Choi[10]은 무인기의 임무할당 문제를 GA와 MILP로 접근하였으며, Lee[11,12]는 요격미사일의 할당 문제를 MILP로 변형하고 CPLEX 솔버를 적용하여 최적성과 실시간성에서 좋은 성능을 보였다. 그러나 최적화 문제가 비선형이 매우 크고 이진 변수로 구성되지 않을 경우 선형화에 필요한 추가 변수의 증가로 계산 시간을 저해하는 문제가 있다.

본 논문에서는 동적 교전환경 하에서의 무장할당 문제를 다루며, 시간가변요소를 고려하여 동적 무장할당 문제를 정식화하였다. 시간가변요소에 의해 비선형이 크기 때문에 무장할당 문제의 최적해 산출을 위하여 메타휴리스틱 기법인 GRASP 알고리즘을 적용하였다. 해상환경 하에서의 교전 시뮬레이션을 통해 정식화한 무장할당 문제의 최적해 특성을 파악하였다. 또한 Monte-Carlo 시뮬레이션을 수행하여 GRASP 알고리즘의 성능을 검증하였으며, 실시간 준최적해 산출 알고리즘인 Maximum Marginal Return(MMR) 알고리즘과 GRASP 알고리즘을 비교하여 최적성 및 실시간성 분석을 수행하였다.

## II. 동적 무장할당 문제

본 절에서는 위협의 잔여 가치를 최소화하는 위협 기반 할당 문제에 대하여 교전가능시간(Time Window) 개념을 고려하여 동적 무장할당 문제를 정의하고 정적 무장할당 문제에서 고려하지 못하는 시간요소를 반영하여 목적함수와 구속조건을 정식화한다.

Figure 1은 일반적인 무장할당 문제에 대한 교전 기하를 나타내며 Threat 은 'T', Weapon은 'W'로 표기한다. T1과 T2에 대하여 할당 가능한 무장 W1과 W2가 존재하고 모든 무장은 동시에 발사가 가능하다고 가정할 때, 위협 및 무장의 기동 특성과 무장 가용 범위가 서로 다르기 때문에 T1과 T2에 대해 서로 다른 W1과 W2의 명중점이 형성된다. 위협-무장 조합은 (T1 - W1, T2 - W1), (T1 - W1, T2 - W2), (T1 - W2, T2 - W1), (T1 - W2, T2 - W2)의 4가지가 존재하며, 기존 무장할당 문제에서는 위의 조합에 대하여 정적인 무장할당 결과를 도출한다. 하지만, 실제 교전환경에서는 무장 할당 시 할당과 발사가 동시에

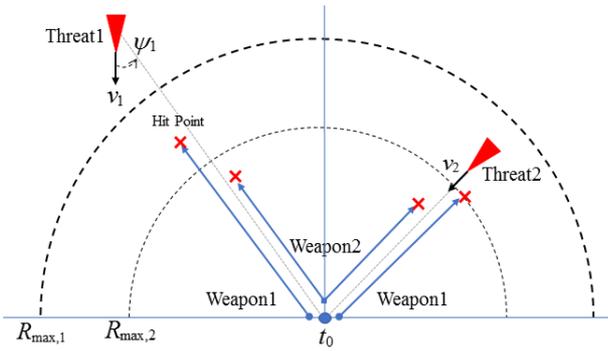


Fig. 1. Engagement Geometry in WTA

일어나지 않고 무장별로 할당-발사-요격 시까지 소요되는 시간들이 다르기 때문에 무장할당 문제에서 시간가변적인 특성들을 고려할 필요가 있다.

Time Window는 무장의 교전능력을 나타내는 시간 개념으로써 교전가능시간으로 정의한다. 교전가능시간은 무장 발사 이후 위협과 무장의 기동 특성에 따른 비행시간(Time of Flight, TOF)과 무장 운용에 따른 발사시각에 영향을 받는다. Fig. 2는 교전가능시간에 대한 개념을 나타낸 것으로  $\tau_S$ 는 최대사거리에서 위협을 요격시키기 위한 무장발사시각,  $\tau_E$ 는 최소사거리에서 위협을 요격시키기 위한 무장발사시각을 의미한다. 무장할당 시 계산된 발사시각이  $\tau_S < t < \tau_E$  인 경우 교전 가능한 상태로 무장 할당이 가능하며, 이외의 경우는 물리적으로 교전 불가능한 상태로 무장 할당이 불가능하다.

단순 기동하는 위협 및 무장에 대하여 단일 무장을 순차적으로 발사할 경우 초기에 계산한 교전가능시간 내에서 발사가 이루어지며 즉각적으로 대응 능력을 확인할 수 있다. 그러나 위협의 기동 또는 다른 무장의 개입으로 인해 발사지연이 발생하면 교전가능시간을 재계산해야한다. 위협과 무장의 기동 특성은 기동예측 모델의 정확도 문제로 귀결되기 때문에

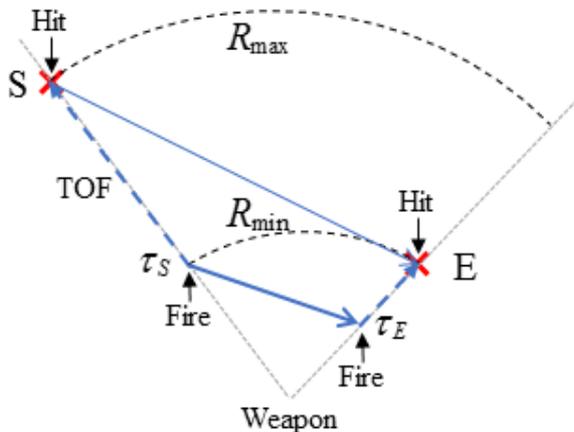


Fig. 2. Concept of Time Window

본 논문에서는 위협과 무장 모두 기동 없이 직선 비행한다고 가정하고 정확한 궤적 예측을 수행한다. 따라서 교전가능시간 계산에서는 다른 무장의 개입으로 인한 발사지연만을 고려한다.

발사시각은 다수위협-다중무장 환경에서 교전가능시간 계산에 지배적인 영향을 미친다. 할당-발사 메커니즘에는 무장 발사 장치의 구동 시간, 무장준비시간 그리고 다중 무장 운용에 따른 제약 사항이 존재하여 무장을 할당함에 따라 연쇄적으로 시간 종속적인 결과가 나타난다. 일련의 발사 메커니즘을 단순화하기 위하여 독자적인 운용에 따른 발사준비시간과 무장간 제약에 따른 발사간격으로 분류하여 시간종속성에 따른 특성을 고려한다.

Figure 3은 Fig. 1의 교전 기하에 대해 두 가지 교전가능시간을 나타내고 있으며 1번 예시는 (T1-W1, T2-W2)의 무장할당 결과를, 2번 예시는 (T1-W2, T2-W1)의 무장할당 결과를 나타낸다. T1에 첫 번째 무장을 할당하면 T2에 무장을 할당할 때에는  $\Delta t$ 만큼의 시간지연을 고려하여 무장발사시각을 계산하고 동시에 T2의 진입 정도를 반영한 새로운 예상명중점을 산출해야한다. 첫 번째 위협-무장 할당이 이후의 모든 무장할당 결과에 영향을 미치며 대응할 위협이 많은 경우 매 할당과정의 영향성이 커지게 된다.

본 논문에서는 동적 무장할당 문제를 정식화하기 위하여 다음의 가정사항을 고려한다.

1. 진입하는 위협에 대하여 빠르게 접근하는 위협 순으로 무장을 할당한다.
2. 무장의 할당 및 발사는 의도적인 시간지연 없이 이루어지며, 일정한 절차를 따른다.
3. 한 위협 당 한 종류의 무장을 할당하며 여러 발사 가능하다.

고려사항 1의 경우 위협-무장 조합을 위협순위로 오름차순 정렬하여 할당하는 것을 의미한다. 위협순위를 변경하여 고위험의 위협을 차순위로 할당할 경우 요격 실패 시 위협 부담이 있기 때문에 이를 배제한다. 고려사항 2는 무장의 발사시각 제어를 배제하기 위한 것으로 무장할당 문제에서 발사시각 최적화가 아닌 교전능력 내에서의 순차적 무장 할당을 의미한다. 무장의 명중률을 높이기 위한 의도적인 할당/발사 대기는 목적함수 최적화에는 큰 효과를 얻을 수 있지만, 도출된 위협-무장 조합 및 할당시각으

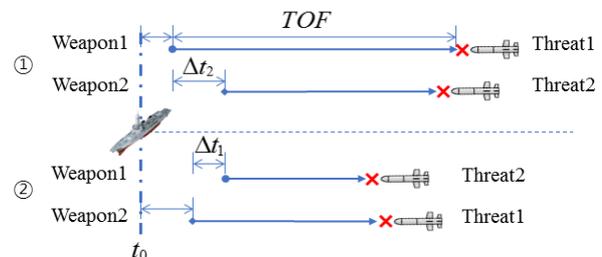


Fig. 3. Examples of Time Window in WTA

로 무장 할당 후 요격 실패 시 위협 부담을 야기한다. 고려사항 3은 무장 운용 측면을 고려한 것으로, 이종 무장의 동시 운용에 따른 운용 절차, 기동 특성과 같은 이질성을 배제한다.

### 2.1 위협도 함수 정의

전투기나 유도탄과 같은 위협들은 서로 다른 기동 특성을 가지며 아군으로 접근함에 따라 위협도가 증가한다. 일반적으로 멀고 속력이 느린 위협은 위협도가 낮으며, 가깝고 속력이 빠른 위협은 위협도가 높다. 본 논문에서는 위협의 기동 특성을 정량화하기 위하여 위협도 함수를 거리, 속력, 진행방향을 대표하는 잔여비행시간(Time-To-Go)으로 모델링한다. 임의 시간  $t$ 에서 위협  $i$ 의 잔여비행시간의 역수로 표현된 위협도 함수  $V_i(t)$ 는 Fig. 4와 같은 특성을 가지며 먼거리 위협의 경우 그 값과 변화량이 작지만 아군에 근접함에 따라 영향도가 급변한다.

$$V_i(t) = \frac{1}{TTG_i(t)} \tag{1}$$

### 2.2 문제 정식화

동적 무장할당 문제에서의 수학적 모델을 위한 표기는 다음과 같다.

- $J$  : 목적함수
- $n_T$  : 위협 수
- $n_W$  : 무장 종류
- $W_j$  : 무장  $j$ 의 총 보유량
- $i$  : 위협 인덱스(위협 순위로 정렬),  $i=1, \dots, n_T$
- $j$  : 무장 인덱스,  $j=1, \dots, n_W$
- $t_{ij}^h$  : 위협  $i$ 에 대한 무장  $j$ 의 예상명중시각
- $t_{ij}^l$  : 위협  $i$ 에 대한 무장  $j$ 의 발사시각
- $\Delta t_j$  : 무장  $j$ 의 발사간격
- $\tau_{Sij}$  : 위협  $i$ 에 대한 무장  $j$ 의 최초 교전가능시간
- $\tau_{Eij}$  : 위협  $i$ 에 대한 무장  $j$ 의 최후 교전가능시간
- $V_i(t_{ij}^h)$  : 무장  $j$ 에 대한 위협  $i$ 의 예상명중시각에서의 위협도
- $P_{ij}(t_{ij}^h)$  : 위협  $i$ 에 대한 무장  $j$ 의 예상명중시각에서의 명중률
- $p_{ij}(t_{ij}^h)$  : 위협  $i$ 에 대한 무장  $j$ 의 예상명중시각에서의 단발 명중률

- 결정변수

- $X_{ij}$  : 위협  $i$ 에 대한 무장  $j$ 의 할당 여부, (0: 미할당, 1: 할당)
- $x_{ij}$  : 위협  $i$ 에 대한 무장  $j$ 의 할당 발수 (교전교리를 따를 경우 제외)

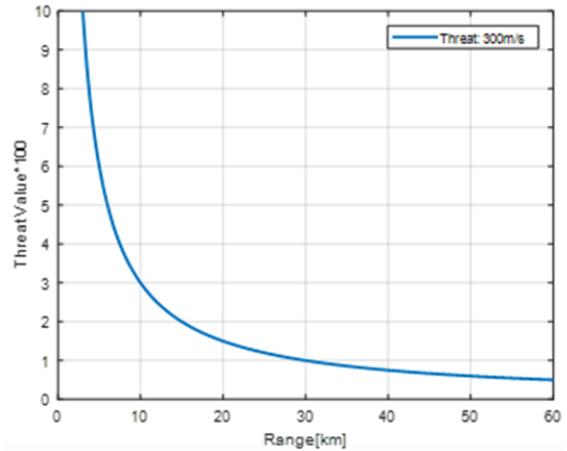


Fig. 4. Threat Value Model

여기서  $P_{ij}(t_{ij}^h)$ 는 단발 명중률에 대한 결합 확률을 의미한다.

$$P_{ij}(t_{ij}^h) = 1 - (1 - p_{ij}(t_{ij}^h))^{x_{ij}} \tag{2}$$

시간가변요소를 고려한 목적함수는 식 (3)과 같다. 목적함수는 하나의 위협에 대한 다수의 무장 할당을 고려하기 위하여 결정변수가 지수항으로 표현되는 비선형 계획 모형을 가진다. 또한 시간가변요소를 고려하면서 위협도와 명중률이 곱연산을 이루게 되어 목적함수는 결정변수에 대한 선형함수가 아닌 지수항의 비선형함수가 된다. 목적함수의 기본 형태인  $V(1 - P)$ 는 (위협도 $\times$ 명중실패확률)이며 위협의 생존 가치를 최소화하기 위한 최적 할당 전략을 나타낸다. 여기서 무장의 할당 여부 및 발수에 따라 예상명중 시각은 중속적으로 결정된다.

$$\text{Minimize } J = \sum_{i=1}^{n_T} \prod_{j=1}^{n_W} [V_i(t_{ij}^h)(1 - P_{ij}(t_{ij}^h))]^{x_{ij}} \tag{3}$$

subject to

$$\sum_{j=1}^{n_W} X_{ij} \leq 1, \quad \forall i \tag{4}$$

$$\sum_{i=1}^{n_T} x_{ij} \leq W_j, \quad \forall j \tag{5}$$

$$t + \tau_{Sij} \leq t_{ij}^l \leq t + \tau_{Eij} \tag{6}$$

$$t_{(i+1)j}^l - t_{ij}^l \geq \Delta t_j \tag{7}$$

식 (4)는 각 위협에는 이종의 무장을 동시에 할당하지 않음을 기술한 구속조건이며 무장할당 고려사항 3에 해당한다. 식 (5)는 무장 할당량이 총 보유량을 초과할 수 없음을 기술하는 구속조건이다. 식 (6)은 무장 발사시각이 교전가능시간 내에 존재해야함

을 기술한 구속조건으로 교전 시 무장의 최소/최대 사거리를 만족함을 의미한다. 식 (7)은 위협 간에 할당된 무장에 대해서  $\Delta t_{j+}$ 의 발사간격을 두고 순차적으로 발사됨을 의미한다.

목적함수 (3)과 구속조건 (4)~(7)로 구성된 동적 무장할당 문제는 하나의 위협에 무장이 할당되면 이후 위협들에 대한 무장의 교전가능시간은 변하게 된다. 이러한 위협들에 대해 일련의 무장할당 후보를 선정하고 평가를 통해 최적해를 탐색하는 알고리즘이 필요하며, 다음 절에서는 이를 위한 메타휴리스틱 알고리즘을 소개하고 동적 무장할당 문제에 적용한다.

### III. GRASP 기반 무장할당 알고리즘

무장할당 문제는 전형적인 NP-Complete 문제로 위협 및 무장의 규모가 작을 경우에는 지역 탐색 또는 전역 탐색 알고리즘으로 최적해를 찾을 수 있지만, 위협 및 무장 규모가 커질 경우에는 연산량이 지수적으로 커지는 문제로 인하여 최적해를 찾기가 어렵다. 이러한 NP-Complete 문제를 해결하기 위한 방법으로 메타휴리스틱 알고리즘의 일종인 GRASP를 적용하여 최적해를 산출하고자 한다.

#### 3.1 GRASP 알고리즘 개요

GRASP은 조합 최적화 문제에서의 다중 시작 메타휴리스틱 방법으로, 각 시작 지점에서 최적해를 선택하는 과정을 반복하는 알고리즘이다[13]. 시작 지점간의 정보를 서로 공유하지 않는 무기억 연산 특성을 가지며, 이로 인해 병렬처리를 통한 알고리즘 구현이 용이하다.

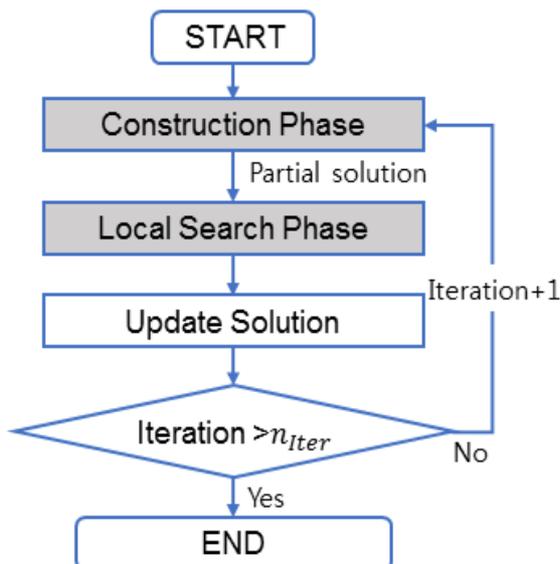


Fig. 5. Flowchart of GRASP

GRASP 알고리즘은 Fig. 5와 같이 ‘Construction Phase’와 ‘Local Search Phase’로 구성되며 최대반복횟수( $n_{Iter}$ ) 내에서 연산을 수행한다. ‘Construction Phase’는 ‘Local Search Phase’를 위한 부분해를 산출하고 ‘Local Search Phase’에서는 이를 바탕으로 해를 개선시킨다. 최종적으로 최대반복횟수 내에서 산출된 국부해를 비교하여 최상의 해를 얻는다.

#### 3.2 Construction Phase

‘Construction Phase’에서는 가용해(Feasible Solution)에 근접한 해를 후보군으로 선정하여 후보군의 임의 조합으로부터 부분해를 산출하며 그 과정은 Fig. 6과 같다.

가용해를 찾는 과정에서는 Restricted Candidate List(RCL)를 산출하며, 위협-무장 후보군을 가상 할당한 후 증분비용(Incremental Cost)을 계산하여 문턱값(Threshold) 이상의 가용 후보를 선정한다. 문턱값은 가상 할당 결과로부터 계산되며 목적함수 최소화 문제에 대하여 식 (8)과 같이 표현한다. 여기서  $IC$ 는 증분비용,  $\alpha$ 는 RCL 파라미터를 의미한다.

$$Threshold = IC^{\min} + \alpha(IC^{\max} - IC^{\min}) \quad (8)$$

식 (8)에서  $\alpha=0$ 인 경우 문턱값은 항상  $IC$  최소값이 되므로 모든 무장에 대해 임의 무장을 선정하는 Random MMR과 동일한 특성을 가지며,  $\alpha=1$ 인 경우 항상  $IC$  최대값을 가지는 무장을 선정하는 Greedy MMR과 동일한 특성을 갖는다[13].

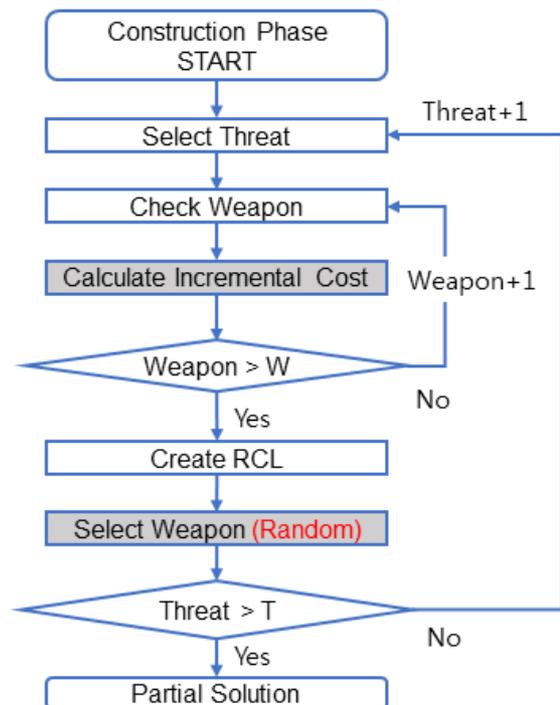


Fig. 6. Flowchart of Construction Phase

$\alpha$ 는 RCL 선택의 다양성에 영향을 미치는데  $\alpha$ 가 클 경우 다양성이 줄어들어 탐색 영역이 축소되며  $\alpha$ 가 작을 경우 다양성이 늘어 탐색 영역이 확장된다. 그러나 탐색 영역의 확장은 랜덤성을 기반으로 한 다중 시작 문제에서 많은 반복횟수를 요구하기 때문에 최적해 탐색에 필요한 연산시간이 증가한다. 효율적인 탐색을 위한  $\alpha$ 의 선정이 필요하며, 최소한의 다양성 확보를 위하여 2개 이상의 RCL을 산출할 수 있도록 문턱값 내의 후보군을 추가로 고려한다.

RCL 산출에 있어 가장 중요한 것은 증분비용을 정의하는 것이다. 무장할당 문제에 있어 증분비용은 목적함수 내에서 전체 비용을 최소화하기 위한 최적해 탐색 전략의 지표로 고려된다. 앞서 고려한 무장할당 전략에 따라 위협에 신속히 대응하기 위해 증분비용은 부분 비용의 역수로 정의하며, 식 (9)와 같다.

$$IC = 1/J_{ij}^-, \quad \forall j$$

$$= 1/[V_i^-(1-P_{ij}^-)] \tag{9}$$

### 3.3 Local Search Phase

‘Local Search Phase’는 부분해를 기점으로 인접한 영역을 추가 탐색함으로써 해를 개선하는 단계로 그 과정은 Fig. 7과 같다. 탐색 방법은 타부서치(Tabu Search) 기법의 일종인 해밍거리(Hamming Distance, HD)를 고려하여 각 위협에 이웃한 무장 후보군을 변경한다. HD가 커질수록 탐색 영역이 증가함에 따라 연산 소요 시간이 증가하는데, GRASP에서는 최대반복횟수로 상호 보완 가능하므로 HD=1로 설정한다. 이는 부분해의 위협-무장 조합들에 대하여 한 쌍의 위협-무장 조합만이 다른 후보군을 도출하는 것을 의미하며, 가용한 후보군들로부터 최상의 해를 국부해로 산출한다.



Fig. 7. Flowchart of Local Search Phase

## IV. 시뮬레이션 결과

무장할당 문제에서의 최적해 탐색과 알고리즘의 성능 분석을 위하여 해상 교전환경에서 시뮬레이션을 수행하였다. 함정의 탑재무장은 A/B/C 3종을 고려하였으며, 무장 정보는 Table 1과 같이 설정하였다. 명중률은 무장의 최대, 최소, 유효 사거리를 이용하여 계단형으로 모델링하였다. 세부 파라미터는 보안상의 이유로 생략한다.

### 4.1 수학적 모델링 검증

최적 할당 특성을 파악하기 위한 단일 교전 시나리오는 Fig. 8과 Table 2와 같으며, 10km 및 20km에 위치한 10개의 위협이 동시에 함정으로 진입한다.

Table 1. Properties of Weapon

Weapon Type	Speed [m/s]	Range [m]	Kill Probability
A	1200	5000 - 27500	0.80
		27500 - 50000	0.50
B	800	1000 - 10500	0.96
		10500 - 20000	0.75
C	1000	200 - 2000	0.99

Table 2. Properties of Threat for Single-Run

No. Threat	Speed [m/s]	Initial Range [m]
10	300	10000, 20000

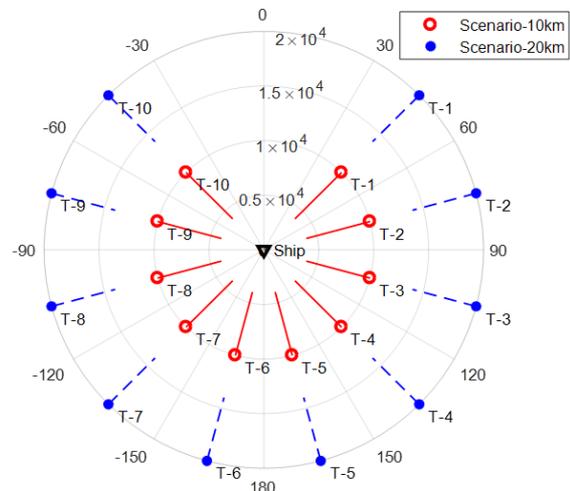


Fig. 8. Examples of Engagement Scenarios

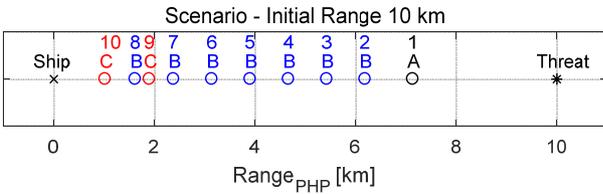


Fig. 9. Weapon Assignment Result - 10km

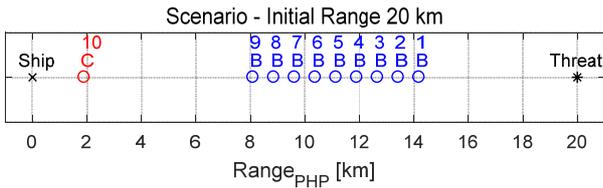


Fig. 10. Weapon Assignment Result - 20km

최적해 특성 분석을 위하여 전역 탐색(Brute Search)을 수행하였으며, 시나리오별 최적 할당 결과는 Fig. 9와 10과 같다. ‘Threat’ 위치로부터 ‘Ship’ 위치까지 순차적으로 위협의 요격 거리를 나타내며, 첫 번째 열은 위협 순위(1~10), 두 번째 열은 할당 무장(A/B/C), 세 번째 열은 위협에 대한 할당 무장의 예상명중률을 의미한다.

10km 교전 시나리오에서 위협 1에는 무장(A)를 할당하며 위협 2~8에는 무장(B), 위협 9~10에는 무장(C)를 할당한다. 해당 교전 시나리오에서 모든 무장은 위협에 대하여 최대 명중률을 가지며, 위협 1의 경우 무장(A)의 명중률은 80%이고 무장(B)의 명중률은 96%이다. 무장(B)의 명중률이 무장(A)보다 높지만 시간이변요소를 종합적으로 고려하여 명중률이 가장 높은 무장(B)가 아닌 무장(A)를 할당한다. 무장(B)로는 위협 8까지 최대로 대응한 이후 잔여 위협에 대해서는 무장(C)를 할당한다.

20km 교전 시나리오에서는 위협 10을 제외하고는 모두 무장(B)를 할당한다. 명중 구간에 따라 최대 명중률이 다양하게 나타나며, 위협 1~5까지 무장(B)를 할당할 경우 명중률은 75%(최소)이며 무장(A)를 할당할 경우 명중률은 80%(최대)이다. 무장(A)는 무장의 속도 특성으로 인해 비행시간이 작으며, 무장(B)가 최대 명중률이 되는 지점(10.5km)까지 많은 위협을 할당할 수 있다. 무장(A)로는 먼 거리에서의 요격은 가능하지만 목적함수 측면에서 볼 때 위협도, 명중률 관계에서 명중률을 높이는 방향으로 무장을 할당하는 것이 목적함수 최소화에 더 이점이 있다. 그 결과로써 무장할당 초기에 대응 성능이 낮은 무장(B)를 할당하여 최대 명중률에서의 무장할당률을 높이고 무장할당 전략이 수립됨을 확인할 수 있다. 무장(C)는 명중률은 높지만 짧은 사거리로 인해 대응능력이 낮기 때문에 최대사거리에서 위협 10을 할당하여 위협의 잔여가치를 최소화한다.

### 4.2 GRASP 알고리즘 검증

GRASP 알고리즘에 대한 성능분석을 위하여  $n_{Iter}$  변화에 따라 1000회의 Monte-Carlo 시뮬레이션을 수행하였다. 교전 시나리오는 Table 3과 같으며 Fig. 11은 임의 시나리오에 대한 예시이다. 성능분석을 위한 GRASP의 RCL 파라미터의 경우  $\alpha = 0.3$ 으로 설정하였다.

성능분석을 위하여 최적성은 전체 시뮬레이션 횟수에 대하여 최적해를 만족하는 시뮬레이션 횟수의 비율로 계산하였다. 연산시간은 알고리즘 연산에 따른 평균 CPU 계산 시간을 산출하였으며 연산 환경은 Intel i7-6700 CPU 3.40 GHz, 16 GB RAM, Visual Studio 2010 C++를 사용하였다.

Figures 12와 13은 Monte-Carlo 시뮬레이션 결과로,  $n_{Iter} = 500$ 에 대해 99% 이상의 탐색 성능을 보이며 800 이상의  $n_{Iter}$ 에서는 최적해(최적성 100%)가 산출됨을 확인할 수 있다. 최적해 탐색 시 연산량은 약 0.2sec 소요되며, 10개의 위협에 대하여 전역 탐색 대비 연산 시간이 4배 정도 개선됨을 확인할 수 있다.

Figure 14는 Greedy MMR 알고리즘과의 성능 비교를 위한 Monte-Carlo 시뮬레이션 결과로,  $n_{Iter} = 800$ 일 때의 GRASP과 Greedy MMR 알고리즘 결과를 비교하였다. 가로축은 Monte-Carlo 시뮬레이션의 1000회 시나리오에 대하여 Cost를 기준으로 오름차순 정렬한 것을 의미한다. MMR 알고리즘의 경우 연산 시간이 0에 근접하여 실시간 연산이 가능한 것으로

Table 3. Properties of Threat for Monte-Carlo

No. Threat	Speed [m/s]	Initial Range [m]
10	$U[200,300]$	$U[5000,30000]$

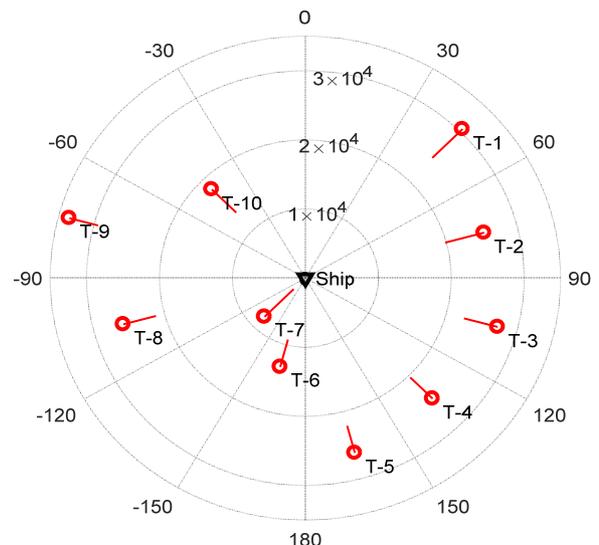


Fig. 11. Example of Engagement Scenarios

알려져 있지만, 최적해 탐색 성능은 저조하다. 제안한 GRASP 기반 무장할당 알고리즘은 최적성을 100% 만족하며 충분히 짧은 연산 성능을 보이고 있다.

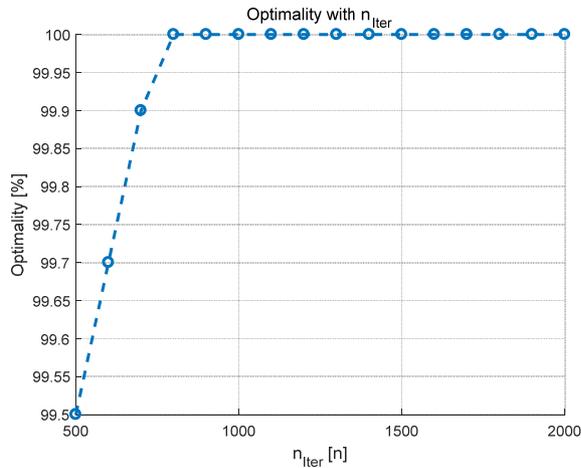


Fig. 12. Optimality with  $n_{Iter}$

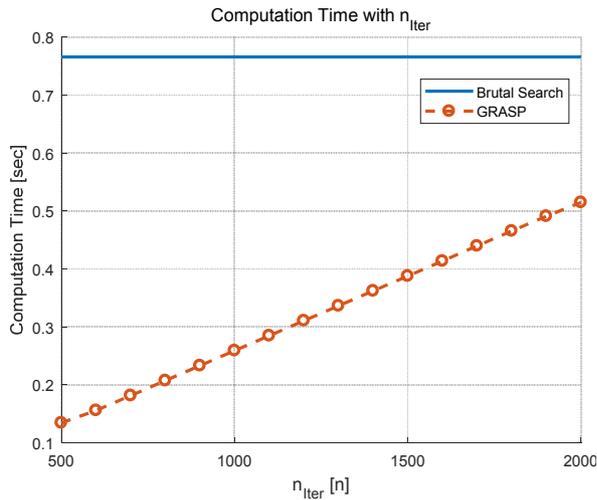


Fig. 13. Computation Time with  $n_{Iter}$

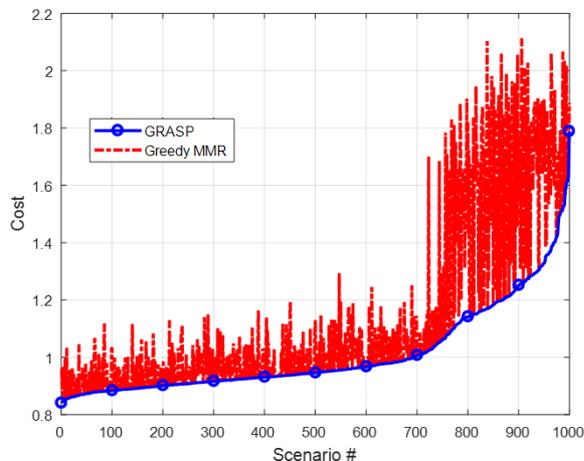


Fig. 14. Cost Evaluation Results

## V. 결론

본 논문에서는 동적 무장할당 문제에 대하여 시간 가변적인 요소를 고려한 정식화를 수행하였으며 동적 무장할당 문제에 GRASP 알고리즘을 적용하는 방안을 제시, 시뮬레이션을 통한 성능분석을 수행하였다. 교전가능시간은 위협과 무장의 기동과 발사시간에 따른 교전가능성을 나타내는 지표로써, 무장할당에 따라 시시각각 변하는 외부(위협)와 내부(무장) 정보를 지속적으로 반영해야한다. 무장할당 문제에서 이러한 시간가변요소를 고려하여 목적함수와 구속조건들을 정식화하였다. 또한 제시한 무장할당 문제에 대하여 MMR과 타부서치 기법의 조합인 GRASP 알고리즘을 적용하여 NP-Complete 문제에서의 최적해 탐색을 도모하였다. 가상 교전 시나리오에 대한 시뮬레이션을 수행하여 정식화한 동적 무장할당 문제의 최적해 할당 전략을 분석하였으며, 성능검증을 통하여 적용 알고리즘의 최적성을 확인하였다. 메타휴리스틱 알고리즘은 실시간성을 만족하는 준최적해 도출에 이점이 있으며, 제안한 알고리즘의 최적해 탐색 성능에 더하여 연산 성능을 개선할 경우 실시간성을 만족하는 무장할당이 가능하다.

## 후 기

본 연구는 국방과학연구소의 지원(No. UD17001DD)을 받아 수행하였으며, 이에 감사드립니다.

## References

- 1) Cai, H., Liu, J., Chen, Y., and Wang, H., "Survey of the Research on Dynamic Weapon-Target Assignment Problem," *Journal of Systems Engineering and Electronics*, Vol. 17, No. 3, 2006, pp. 559~565.
- 2) Lloyd, S. P., and Witsenhausen, H. S., "Weapon allocation is NP-complete," *Proceedings of the IEEE Summer computer Simulation Conference*, 1986, pp. 1054~1058.
- 3) Ibaraki, T., and Katoh, N., *Resource Allocation Problems*, The MIT press, Cambridge, Massachusetts, *Handbook of combinatorial optimization*, Vol. 2, 1998, pp. 156~260.
- 4) Pepyne, D. L., Looze, D. P., Logan, D. A., Sandell, N. R., and LeBlanc, R., "A Decision Aid for Theater Missile Defense," *Proceedings of 1997 IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, April 1997, pp. 563~568.

- 5) Lee, Z. J., and Su, S. F., "Efficiently Solving General Weapon-Target Assignment Problem by Genetic Algorithms With Greedy Eugenics," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B*, Vol. 33, No. 1, 2003, pp. 113~121.
- 6) Lee, D. E., Oh, H. R., Kauh, J. H., Park, Y. W., and Lee, Y. J., "Improved Ant Colony Optimization Algorithm Design for Weapon-Target Assignment," *Proceedings of Symposium of the Korean Institute of Communications and Information Sciences*, Vol. 2011, No. 11, 2011, pp. 410~411.
- 7) Zeng, X., Zhu, Y., Nan, L., Hu, K., Niu, B., and He, X., "Solving Weapon-Target Assignment Problem using Discrete Particle Swarm Optimization," *Intelligent Control and Automation, 2006 6th World Congress on Intelligent Control and Automation*, June 2006, pp. 3562~3565.
- 8) Hong, S. S., Yoo, J. H., Park, S. J., Mun, C. M., and Han, M. M., "A Suite of Heuristic Algorithms for Weapon-Target Allocation in Air Defense," *Journal of Korean Society for Internet Information*, Vol. 13, No. 1, 2012, pp. 195~196.
- 9) Vielma, J. P., "Mixed Integer Linear Programming Formulation Techniques," *SIAM Review*, Vol. 57, No. 1, February 2015, pp. 3~57.
- 10) Choi, H.-J., Seo, J.-B., and Kim, Y.-D., "Task Assignment of Multiple UAVs using MILP and GA," *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 38, No. 5, 2010, pp. 427~436.
- 11) Lee, D. R., and Yang, J. H., "A Study on the Allocation and Engagement Scheduling of Air Defense Missiles by Using Mixed Integer Programming," *Korean Management Science Review*, Vol. 32, No. 4, December 2015, pp. 109~133.
- 12) Lee, D. R., and Yang, J. H., "An Efficient Genetic Algorithm for the Allocation and Engagement Scheduling of Interceptor Missiles," *Journal of Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, Vol. 39, No. 2, June 2016, pp. 88~102.
- 13) Feo, T. A., and Resende, M. G. C., "Greedy Randomized Adaptive Search Procedures," *Journal of Global Optimization*, Vol. 6, 1995, pp. 109~133.