Journal of the KIMST, Vol. 20, No. 4, pp. 566-578, 2017
ISSN 1598-9127
DOI http://dx.doi.org/10.9766/KIMST.2017.20.4.566

Research Paper 체계공학 부문

공격편대군-표적 최적 할당을 위한 수리모형 및 병렬 하이브리드 유전자 알고리즘

김흥섭*,1) · 조용남1)

1) 공군사관학교 시스템공학과

New Mathematical Model and Parallel Hybrid Genetic Algorithm for the Optimal Assignment of Strike packages to Targets

Heungseob Kim*,1) · Yongnam Cho1)

1) *Department of Systems Engineering, Republic of Korea Air Force Academy, Korea*

(Received 20 January 2017 / Revised 20 March 2017 / Accepted 16 June 2017)

ABSTRACT

For optimizing the operation plan when strike packages attack multiple targets, this article suggests a new mathematical model and a parallel hybrid genetic algorithm (PHGA) as a solution methodology. In the model, a package can assault multiple targets on a sortie and permitted the use of mixed munitions for a target. Furthermore, because the survival probability of a package depends on a flight route, it is formulated as a mixed integer programming which is synthesized the models for vehicle routing and weapon-target assignment. The hybrid strategy of the solution method (PHGA) is also implemented by the separation of functions of a GA and an exact solution method using ILOG CPLEX. The GA searches the flight routes of packages, and CPLEX assigns the munitions of a package to the targets on its way. The parallelism enhances the likelihood seeking the optimal solution via the collaboration among the HGAs.

Key Words : Strike Package(공격편대군), Weapon-Target Assignment(WTA, 무기-표적 할당), Vehicle Routing Problem (차량경로문제), Hybrid Parallel Genetic Algorithm(하이브리드 병렬 유전자 알고리즘)

기 호 설 명

$\mathbf{T}$: 표적의 집합; $\mathbf{T}=\{1,2,...,|\mathbf{T}|\}$
$\mathbf{N}$: 전체 노드의 집합; 기지=$\{0\}$, $\mathbf{N}=\mathbf{T}\cup\{0\}$
$\mathbf{K}$: 공격편대군(무장) 구성형태의 집합; $k\in\mathbf{K}$
$\mathbf{B}$: 무장종류의 집합; $b\in\mathbf{B}$
$\mathbf{A}$: 항공기 기종의 집합; $a\in\mathbf{A}$
$\mathbf{H}$: 구성형태별 편대군의 순번; $h\in\{1,2,...,|\mathbf{H}|\}$
$\mathbf{R}_{hk}$: 구성형태가 k인 편대군들 중 h번째 편대군의 비행경로 노드 집합
w_i : 표적 i의 전략적 가치

* Corresponding author, E-mail: heungseob79@gmail.com
Copyright ⓒ The Korea Institute of Military Science and Technology

t_{ij} : 노드 i에서 j로 비행 시 소요시간
p_{kbi} : 구성형태가 k인 편대군이 무장 b로 표적 i를 파괴할 확률
P_{kij}^{s} : 편대군 k가 노드 i에서 j로 비행 시 생존확률
C_{ka} : 공격편대군 k에 포함된 항공기 a의 대수
$B_{i}^{\max}$: 표적 i 공격에 사용하는 무장발수의 제한치
q_{kb} : 공격편대군 k에 장착된 무장 b의 발수
M : Big M(Sufficiently large number)

1. 서 론

현대전의 대표적 개념은 정보수집체계의 통합을 통해 실시간으로 전장 정보를 공유하는 네트워크중심전(NCW: Network Centric Warfare)과 핵심표적만을 정밀타격하여 조기에 전쟁목표를 달성하고자하는 효과중심작전(EBO: Effect Based Operation)으로 정의된다. 즉, 다양한 전장 정보를 바탕으로 전략적 목표를 선정하고, 그 전략적 목표를 달성하기 위한 핵심표적에 대해 정밀유도무기(PGM: Precision Guided Munition)로 외과적 공격(Surgical attack)을 수행하는 개념이다. 이와 같이, 무기체계의 발전은 작전 수행방식 등에서 전쟁의 패러다임의 변화를 유도하여왔다. 이러한 전장환경의 변화에 따라 군사OR(Operations Research)의 대표적인 주제 중 하나인 무기-표적 할당(WTA: Weapon-Target Assignment) 문제도 현대전에 부합하기 위해 지속적으로 연구되어 왔다.

WTA 문제는 1951년에 Merrill Flood가 '다수의 화기를 다수의 표적에 적절히 할당하여 탄약을 절약하고 공격효과를 극대화'하기 위한 최적화 모형을 제안한 이후, 공격효과 평가 함수를 개선한 Manne[1]의 모형을 기초로 활발한 연구가 진행되었다. 초기 WTA에 대한 연구들은 지상군 간의 전투에 초점을 맞추고 있으나, Griggs[2]는 공격편대군(Strike package) 개념을 도입하여 공군작전에 적용하기 위한 WTA 모형을 제시하였다. 공격편대군은 임의 표적에 대한 공격작전을 수행함에 있어 작전성공률과 생존성 향상을 위해 공격임무를 수행하는 공격기 편대를 비롯해 적의 지상·공중 위협으로부터 아군 항공기들을 보호하기 위한 대공제압기, 엄호기 편대들로 구성된다. 따라서 공군의 작전계획 수립을 위한 WTA는 표적에 무장을 장착한 항공기를 할당하는 개념이 되어 항공기-표적 할당(Aircraft-Target Assignment) 문제로 불리기도 한다. 항공기-표적 할당과 전통적인 WTA와의 가장 큰 차이는 표적 파괴확률 이외에 공격편대군이 표적을 공격하기 위해 표적에 접근해야하고, 이로써 적의 공격에 의한 피격확률이 존재한다는 것이다. 또한, 항공기-표적 할당에 대한 기존 연구들은 '표적 당 쏘티(Sortie)를 할당'하는 모형과 '쏘티 당 표적을 할당'하는 모형으로 구분된다[3,4].

'표적 당 쏘티(Sortie)를 할당'하는 모형은 기존 WTA 문제와 유사하게 공격편대군이 1쏘티 비행으로 1개의 표적만을 공격하는 것으로 가정하고 있다[2,5-8]. 하지만, PGM의 등장으로 현대전에서는 공격편대군은 1쏘티에 복수의 표적을 공격할 수 있게 되었다. 실례로, 1991년 걸프전에서 F-117 전폭기는 2,000 파운드 무장 2발로 2개의 표적을 공격하였으며, 이라크전에서 미공군은 공격계획 수립 시 쏘티 당 몇 개의 표적을 파괴할 수 있을 것인가를 고민하였다[4]. 이러한 배경에서 Rosenberger *et. al.*[9]은 WTA의 기본 모형을 확장하여 '쏘티 당 표적을 할당'하는 모형을 최초로 제안하였으며, Lee and Yang[4]은 Rosenberger *et. al.*[9]의 모형을 기초로 해 탐색공간을 축소한 혼합정수계획(MIP: Mixed Integer Programming) 모형을 제안하였다.

또한, WTA에 대한 초기 연구[1,10,11]들은 WTA 모형을 비선형계획(Nonlinear programming)으로 표현함에 따라 근사치를 통한 해법을 제시하였다. 이후 Lloyd and Witsenhausen[12]에 의해 WTA가 NP-Complete에 속하는 조합 최적화(Combinatorial optimization) 문제임이 증명되고 WTA 문제의 해법에 대한 연구가 활발히 진행되었다. 몇몇 연구들은 한 종류의 무장[13] 또는 표적 당 무장 1발 이내[14,15]와 같이 제한된 가정 하에서 최적해법(Exact solution method)을 제안하였다[16]. Kwon et. al.[17]은 대수변환(Logarithmic trans- form)을 통해 선형화된 WTA 모형을 제안하고, 해법으로써 라그랑지안 이완기법(Lagrangian relaxation approach)와 분지한계법(Branch-and-Bound Method)을 적용하였다. Ahner and Parson[18]과 Parson[19]은 근사 동적계획법(Approximate Dynamic programming)을 제안하였다. Ahuja *et al.*[20]은 WTA 문제를 네트워크 흐름(Network flow) 모형으로 고려하여 하한(Lower bound)을 탐색을 위한 분지한계법과 상한(Upper bound)을 탐색하기 위한 이웃해 탐색 기반의 휴리스틱(Heuristic)을 제시 하였다. 최근에는 주로 유전자 알고리즘(GA: Genetic Algorithm)[21-24], 신경망(Neural Network)[12], 타부서치(Tabu Search)[25], 개미군집 최적화(Ant Colony Optimization)[26,27], 모의담금질

(Simulated Annealing)[28] 알고리즘 등과 같은 메타-휴리스틱(Meta-heuristic) 해법을 이용한 연구들이 수행되었다. 또한, Naeem and Masood[29]은 안정적인 결혼 알고리즘(Stable marriage algorithm), Tokgöz and Bulkan[28]은 VNS(Variable Neighborhood Search) 기법 등 조합최적화 문제를 위한 해법을 WTA에 적용하였으며, 일반적인 GA와 면역알고리즘(Immune Algorithm), 휴리스틱 기법 등을 혼합한 하이브리드 알고리즘(Hybrid Algorithm)이 적용되기도 하였다[30-32].

본 연구에서는 기존 연구들을 바탕으로 '쏘티 당 표적을 할당'하는 개념에서 새로운 최적화 수리모형(Mathematical model)과 해법으로써 병렬 하이브리드 유전자 알고리즘(PHGA: Parallel Hybrid GA)을 제안하였다. 새롭게 제안하는 수리모형에서는 복수의 표적에 대해 공격작전을 수행하는 공격편대군의 생존확률 평가 방법이 개선되어 적용되었다. 또한, 개선된 생존확률 평가 방법에 의해 할당된 표적들의 공격 순서가 생존확률에 영향을 미치게 되었으며, 이에 따라 공격편대군의 비행경로(Flight route)가 작전목표 달성도에 영향을 미치게 되었다 [2.1절 참조]. 즉, 기존 연구들에서는 '공격편대군-표적', '표적-무장'의 조합을 결정하였지만, 본 연구에서는 '공격편대군의 비행경로'가 추가적으로 고려된다. 따라서 본 연구에서는 WTA와 차량경로문제(VRP: Vehicle Routing Problem)가 통합된 유형의 문제가 제시되었다. 또한, WTA 문제와 VRP가 각각 NP-Complete, NP-hard[33]인 조합최적화 문제에 포함되므로 제안하는 문제는 NP-hard에 포함되며, 비선형 목적함수를 갖게 됨에 따라 이에 대한 해법으로 병렬 하이브리드 유전자 알고리즘(PHGA)을 제안하였다. 알고리즘의 병렬화(Parallelism)는 복수의 HGA가 해 탐색과정에서 상호간 협력하도록 설계되었음을 의미한다. HGA는 기존 연구들과 달리 두 가지의 알고리즘이 임무를 분장하도록 설계되었다. 즉, '공격편대군-표적'과 '비행경로(공격순서)'는 GA가 담당하고, 각 공격편대군의 비행경로 상의 표적들에 무장 할당('표적-무장')은 최적해법을 적용하였다. GA는 MathWorks사의 MATLAB, 최적해법은 IBM사의 ILOG CPLEX를 통해 구현하였으며, 두 가지 프로그램의 연동을 통해 HGA가 구현되었다. 이러한 하이브리드 전략에는 실제 전투기의 무장장착 능력을 고려할 때, 쏘티 당 공격 가능한 표적 수의 제한으로 공격편대군별 WTA도 작은 사이즈로 구성되어 최적해(Optimal solution) 탐색에 많은 시간이 소요되지 않지만 공격효과에는 지대한 영향을 미친다는 현실적인 고려사항이 반영되었다.

본 연구의 2장에서는 기존 연구들이 고려하고 있는 생존확률에 대한 문제점을 분석하고, 개선된 생존확률 평가 방법을 기반으로 WTA 문제와 VRP가 통합된 유형의 수리모형을 제시한다. 3장에서는 본 연구에서 제시하는 문제의 특성을 고려하여 설계된 PHGA를 소개하고, 4장에서는 임의적으로 생성한 예제를 바탕으로 수행된 수치실험 결과와 수리모형의 해가 제공하는 정보의 효용성을 살펴본다. 마지막으로, 5장에서는 본 연구의 결론과 향후 연구방향을 제시한다.

2. 최적화 수리모형

2.1 생존확률 평가 방법 변경에 따른 효과

기존 연구들[4,9]에서는 임의 공격편대군에게 복수의 표적이 할당될 때, 두 표적 간 이동 시의 생존확률을 비행경로에 독립적으로 가정하였으며, 이에 따라 표적들의 공격순서는 고려할 필요가 없었다. 하지만, 이러한 생존확률의 평가는 현실적인 측면에서 오류가 있다. 예를 들어, 임의의 공격편대군이 기지(⓪)를 이륙하여 표적 ①, ②, ③을 순차적으로 공격한다고 가정하면, 공격편대군이 표적 ②를 공격할 수 있는 기회는 ⓪-①, ①-② 경로 상에서 생존했을 때 부여된다. 따라서 표적 ②를 공격할 때까지의 생존확률은 $(P_{01}\cdot P_{12})$로 고려되어야 한다. 하지만, 기존 연구들의 수리모형은 ①-② 경로의 생존확률 P_{12}만을 고려하도록 설계되었다. 또한, 공격순서를 표적 ②, ①, ③으로 설정하면, 두 번째 표적 ①을 공격할 수 있는 기회는 $(P_{02}\cdot P_{21})$의 확률로 부여된다. 즉, $P_{01}\cdot P_{12} \neq P_{02}\cdot P_{21}$이다. 결론적으로, 공격순서에 따라 생존확률이 변화됨을 직관적으로 알 수 있다. 식 (1)에서 $Z_0(y)$는 기존 모형, $Z_1(y)$은 본 연구의 생존확률 평가 방법을 기준으로 표적별 무장 할당에 대한 해(y)에 대한 공격효과를 나타낸다. 또한, P_{0j}^{s}는 기지를 이륙하여 비행경로에 따라 표적 j에 도착할 때까지 생존할 수 있는 확률을 나타낸다. Fig. 1은 생존확률 평가와 비행경로 변경에 따른 최적해(Optimal solution)의 변화를 보여주고 있다. 기존 모형에서의 최적해(y_0^*)는 비행경로와 독립적이다. 하지만, 동일한 비행경로에서 본 연구의 생존확률 평가 방법을 적용하면 최적해가 y_1^*로 변경되고, 비행경로와 무장 할당을 동시에 고려하는 경우 y^*로 변경된다.

$$Z_0(y)=\sum_{\forall i}\sum_{\forall j} w_i p_{ij} P_{ij} \text{ 또는 } Z_1(y)=\sum_{\forall i}\sum_{\forall j} w_i p_{ij} P^s_{0j} \quad (1)$$

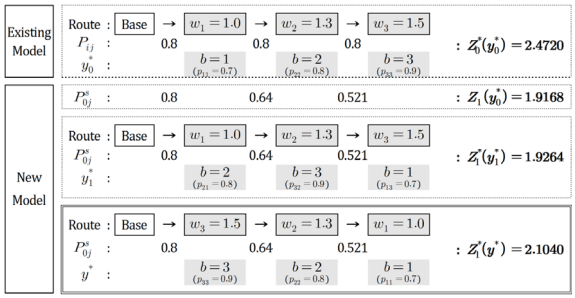


Fig. 1. Optimal solutions of existing/new models

2.2 제안하는 수리모형

본 절에서는 '공격편대군별 표적', '비행경로', '표적별 무장'을 결정하기 위한 수리모형은 WTA와 VRP가 통합된 형태로 제시된다. 여기서, 운용하는 전투기의 기종과 무장의 종류가 제한적이고, 공격편대군 내에서 기종별 담당하는 임무와 Fig. 2와 같이 장착할 수 있는 무장의 조합이 사전에 결정되어 있으므로 공격편대군의 기종별 구성과 무장 장착에 대한 조합 또한 한정적이라는 가정을 둔다. 이는 수리모형의 해 탐색 공간을 축소하는 효과가 있다. 본 장에서 수리모형을 위해 사용하는 표기(Notation)는 다음과 같다. 여기서 굵은 글씨체(Bold)는 집합을, $|\mathbf{A}|$는 집합 $\mathbf{A}$의 크기(Cardinality)를 의미한다.

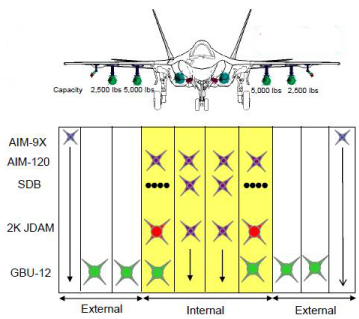


Fig. 2. F-35: Potential weapons configurations

본 연구가 제안하는 식 (2)부터 식 (18)까지의 수리모형은 공격편대군별 표적 할당과 비행경로 결정을 위한 이진형, 표적별 공격무장의 발수에 대한 비음정수 결정변수를 갖는 비선형 혼합정수계획(MINLP: Mixed Integer Nonlinear Programming) 모형이다.

Maximize

$$\sum_{h\in\mathbf{H}}\sum_{k\in\mathbf{K}}\sum_{r\in\mathbf{R}_{hk}} w_r\left[1-\prod_{b\in\mathbf{B}}\left(1-p_{kbr}\right)^{y_{hkbr}}\right]\prod_{z=0}^{|\mathbf{R}_{hk}|-1} P^s_{k,\mathbf{R}_{hk}(z,z+1)} \quad (2)$$

subject to:

$$\sum_{h\in\mathbf{H}}\sum_{k\in\mathbf{K}}\sum_{i\in\mathbf{N}} x_{hkij}\le 1,\ \forall j\in\mathbf{T} \quad (3)$$

$$\sum_{j\in\mathbf{T}} x_{hk0j}\le 1,\ \forall h\in\mathbf{H},\ k\in\mathbf{K} \quad (4)$$

$$\sum_{i\in\mathbf{T}} x_{hki0}\le 1,\ \forall h\in\mathbf{H},\ k\in\mathbf{K} \quad (5)$$

$$\sum_{i\in\mathbf{N}} x_{hkip}-\sum_{j\in\mathbf{N}} x_{hkpj}=0,\ \forall h\in\mathbf{H},\ p\in\mathbf{N} \quad (6)$$

$$x_{hkii}=0,\ \forall h\in\mathbf{H},\ k\in\mathbf{K},\ i\in\mathbf{N} \quad (7)$$

$$\sum_{i\in\mathbf{N}}\sum_{j\in\mathbf{N}} t_{ij}\cdot x_{hkij}\le \mathrm{T}_k,\ \forall h\in\mathbf{H},\ k\in\mathbf{K} \quad (8)$$

$$u_i-u_j+|\mathbf{N}|\sum_{h\in\mathbf{H}}\sum_{k\in\mathbf{K}} x_{hkij}\le|\mathbf{N}|-1,\quad 1\le i\ne j\le|\mathbf{N}| \quad (9)$$

$$\sum_{i\in\mathbf{N}}\mathrm{M}\cdot x_{hkij}-\sum_{b\in\mathbf{B}} y_{hkbj}\ge 0,\ \forall h\in\mathbf{H},\ k\in\mathbf{K},\mathrm{j}\in\mathbf{T} \quad (10)$$

$$\sum_{i\in\mathbf{N}} x_{hkij}-\sum_{b\in\mathbf{B}} y_{hkbj}\le 0,\ \forall h\in\mathbf{H},\ k\in\mathbf{K},\mathrm{j}\in\mathbf{T} \quad (11)$$

$$\sum_{b\in\mathbf{B}} y_{hkbi}\le \mathrm{B}_i^{\max},\ \forall h\in\mathbf{H},\ k\in\mathbf{K},i\in\mathbf{T} \quad (12)$$

$$\sum_{i\in\mathbf{T}} y_{hkbi}\le q_{kb},\ \forall h\in\mathbf{H},\ k\in\mathbf{K},b\in\mathbf{B} \quad (13)$$

$$\sum_{h\in\mathbf{H}}\sum_{k\in\mathbf{K}}\sum_{j\in\mathbf{T}} \mathrm{C}_{ka}\cdot x_{hk0j}\le \mathrm{S}_a,\ \forall a\in\mathbf{A} \quad (14)$$

$$\sum_{h\in\mathbf{H}}\sum_{k\in\mathbf{K}}\sum_{i\in\mathbf{T}} y_{hkbi}\le \mathrm{Q}_b,\ \forall b\in\mathbf{B} \quad (15)$$

$$x_{hkij}=\begin{cases}1, \text{if the } h_{th} \text{ package with configuration } k \text{ flies from node } i \text{ to } j\\ 0, \text{Otherwise}\end{cases},\ \forall h\in\mathbf{H},\ k\in\mathbf{K},\ i\in\mathbf{N} \quad (16)$$

$y_{hkbi} \geq 0$ and Integer, $\forall h \in \mathbf{H}, k \in \mathbf{K}, i \in \mathbf{N}$ (17)

$u_i \geq 0$ and Integer, $i \in \mathbf{N}$ (18)

목적함수 식 (2)는 표적의 전략적 가치, 표적 파괴확률, 공격편대군의 생존확률을 고려한 총 공격효과를 최대화하는 것이다. 여기서, $P^s_{k,\boldsymbol{R}_{hk}(z,z+1)}$은 공격편대군 구성형태가 k인 편대군들 중 h번째 편대군이 z번째 노드에서 $(z+1)$번째 노드로 비행할 때의 생존확률을 의미한다. 식 (3)부터 (9)까지는 공격편대군별 표적할당과 비행경로에 관련된 제약식(Constraint)이다. 식 (3)은 모든 표적의 공격은 1회 이내로 제한됨을, 식 (4)와 (5)는 기지에서 출격한 공격편대군은 할당된 표적들을 공격한 후, 다시 기지로 복귀하여야 함을 의미한다. 식 (6)은 각 공격편대군의 경로연속성(Route continuity)에 대한 제약이며, 식 (7)은 임의의 표적에 머무르지 않음을 의미한다. 식 (8)은 구성형태가 k인 공격편대군의 비행경로는 작전가능시간(T_k)을 초과하지 않도록 설정되어야 함을 의미한다. 식 (9)는 부분순회경로(Sub-tour)의 생성을 방지하기 위한 제약[34]이다. 식 (10)부터 (13)까지는 무장 할당에 대한 제약식이다. 식 (10)과 (11)은 비행경로와 무장 사용을 결합하기 위한 제약식으로, 공격편대군은 비행경로에 포함된 표적에 한해 무장을 사용할 수 있고[식 (10)], 최소 1발 이상의 무장을 사용한다[식 (11)]. 식 (12)는 표적별 사용하는 무장의 최대치를 제한하며, 식 (13)은 공격편대군의 무장별 사용량은 공격기에 장착된 무장 발수 이내에서 사용할 수 있음을 의미한다. 식 (14)는 전체 공격편대군 구성에 대한 기종별 쏘티(S_a), 식 (15)는 무장별 사용 가능량(Q_b)에 대한 상한을 지정한다. 식 (16)부터 (18)까지는 결정변수들의 유형과 범위를 지정하며, 식 (16)과 (17)은 각각 비행경로(x_{hkij})와 무장 사용량(y_{hkbi})에 대한 결정변수이고, 식 (18)은 식 (9)에 대한 결정변수로 임의의 비음정수이다.

3. 병렬 하이브리드 유전자 알고리즘(PHGA)

본 연구는 제2장에서 제시된 비선형 혼합정수계획(MINLP) 모형의 해법으로써 하이브리드 병렬 유전자 알고리즘(PHGA)을 제안한다. 기존 연구들에서의 하이브리드 알고리즘들은 주로 전역탐색(Global search)과 지역탐색(Local search) 알고리즘들을 순차적으로 활용하는 전략을 사용하였다[35-40]. 즉, 전역탐색 알고리즘의 최선해(Best solution)를 기반으로 지역탐색을 통해 보다 우수한 해를 탐색하는 전략이다. 하지만, 본 연구의 HGA는 탐색영역을 '공격편대군별 비행경로'와 '표적별 무장 할당'으로 구분하고 각각 GA와 최적해법을 이용하도록 설계되었다. 즉, 임무분장과 협업 형태의 전략이다. 이러한 하이브리드 전략에는 전투기의 무장장착 능력의 제한으로 쏘티 당 공격할 수 있는 표적이 한정적임에 따라 공격편대군별 WTA 문제가 작은 사이즈로 구성되어 최적해 탐색에 많은 시간이 소요되지 않지만 공격효과에는 지대한 영향을 미친다는 현실적인 고려사항이 반영되었다. GA는 MATLAB, 최적해법은 ILOG CPLEX를 통해 구현하였으며, 두 가지 프로그램의 연동을 통해 HGA가 구현되었다.

또한, 알고리즘의 병렬화(Parallelism)는 복수의 단위 알고리즘들이 해를 탐색하는 과정에서 각각이 탐색한 우수해들을 상호 교환함으로써 협력하는 구조를 묘사하는 것으로, 임의의 단위 HGA이 다른 HGA들로부터 제공받은 우수해 정보를 바탕으로 지역 최적해(Local optima)를 탈출할 수 있는 기회를 부여함으로써 조기수렴(Premature convergence)을 예방하고, 전역 최적해(Global optima)를 탐색할 확률을 증대한다[41]. Fig. 3은 PHGA의 전체적인 수행절차를 표현하고 있다. 또한, 하이브리드 전략이 구현된 적합도 평가(Finess evaluation) 단계에 대한 세부절차는 Fig. 5를 참조하기 바란다.

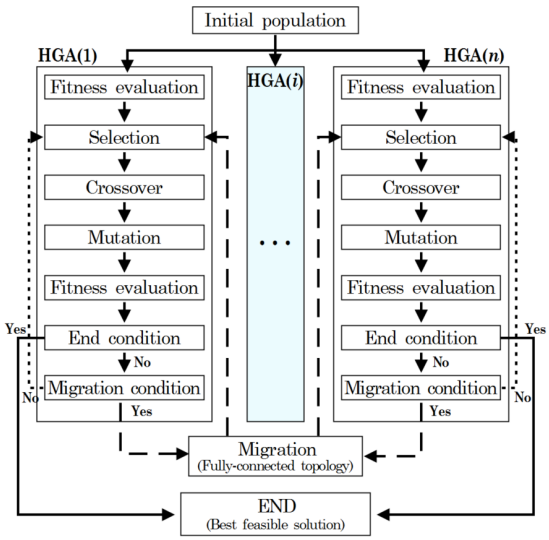


Fig. 3. The framework of a proposed PHGA

3.1 유전자 표현 및 초기 모집단 생성

본 연구에서 유전자는 Fig. 4와 같이 무장장착 수량을 포함하고 있는 공격편대군 구성형태(Formation)의 번호, 공격할 표적의 개수와 순서를 표현하도록 구성하였다. 즉, 표적별 공격무장은 HGA의 잠재해(유전자)에서 추천되지 않으며, 이는 최적해법(CPLEX)이 담당하도록 설계되었다. 이에 대한 내용은 3.2절에서 세부적으로 설명한다. 잠재해 해석에 대한 예시로, Fig. 4에서 1번째 공격편대군은 Type 6로 구성되고 2개 표적(표적 15, 7)이 할당되었으며, 따라서 비행경로는 기지(Base)를 이륙하여 표적 15와 표적 7을 순차적으로 공격하고 기지로 귀환하는 "Base-T_{15}-T_7-Base"로 계획되었다.

Targets				Number of targets				Types of packages			
15	7	…	3	2	3	…	5	6	1	…	10

Fig. 4. Gene representation

각 단위 HGA의 초기 모집단(Initial population)은 임의생성기법(Random generation method)에 의해 생성되었다. Fig. 4의 공격순서(Targets) 부분은 임의 표적이 중복되지 않도록 1부터 표적의 개수(|T|)까지의 숫자가 임의적으로 배치되는 순열(Permutation)로 생성하였다. Fig. 4의 표적 개수(Number of targets) 부분은 각 공격편대군에 할당된 표적 개수의 합이 전체 표적 개수(|T|) 이내가 되도록 임의적으로 배정하였으며, 공격편대군 형태(Types of packages) 부분은 공격편대군 편성종류 범위 내에서 임의적으로 지정하고 공격편대군별 구성형태의 중복을 허락하였다.

3.2 적합도 평가

잠재해의 적합도(Fitness)는 문제의 목적함수와 벌금함수(Penalty function)에 의해 평가되며, 벌금함수는 제약조건이 준수되지 않은 수준에 따라 잠재해의 목적함수 값에 벌금을 부과하는 기준이다. 본 연구에서의 적합도 $f(x)$는 식 (19)와 같이 평가된다.

$$f(x) = \text{목적함수 식 (2)} \div \text{벌금함수 식 (25)} \qquad (19)$$

또한, 제3.1절의 유전자는 표적별 무장 할당에 대한 정보를 포함하지 않기 때문에 목적함수 식 (2)를 계산할 수 없다. 따라서 적합도 평가는 Fig. 5와 같이, ① 각 유전자의 정보를 바탕으로 각 공격편대군이 담당하는 표적들에 무장을 할당, ② 유전자의 정보와 무장할당 결과(①)를 바탕으로 목적함수 식 (2)를 계산, 그리고 ③ 유전자의 제약조건 준수 여부에 따라 목적함수 값(②)에 벌금함수를 적용하는 절차로 수행된다.

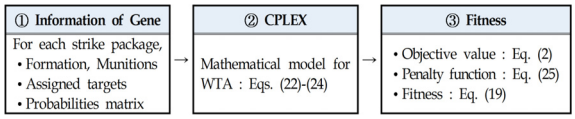


Fig. 5. The procedure for the fitness evaluation

3.2.1 공격편대군별 무장-표적 할당

본 연구의 목적함수 식 (2)는 비선형 함수이기 때문에 ILOG CPLEX에서 제공하는 최적해법을 적용할 수 없다. 따라서 공격편대군별 WTA를 위해 변형된 목적함수를 적용하였다. 식 (20)에서 표적들의 전략적 가치와 생존확률만으로 구성된 항은 무장 할당과 무관한 상수항이므로, WTA의 목적함수는 식 (21)과 같이 변형될 수 있다. 또한, 식 (21)에서 무장에 의한 표적 파괴 확률과 비행경로 상에서의 생존확률에 대한 각 항(Term)을 대수변환(Logarithmic transformation) 함으로써 동일한 최적해를 유도할 수 있는 선형 목적함수 식 (22)를 얻게 된다. 여기서, 파괴확률과 생존확률이 [0, 1]에서 정의됨에 따라 대수변환된 각 항은 음수를 갖게 되고, 이에 따라 문제의 목적함수는 최소화(Min.)로 유지된다.

Max.

$$\begin{aligned}&\sum_{r\in\mathbf{R}_{hk}} w_r\left[1-\prod_{b\in\mathbf{B}}\left(1-p_{kbr}\right)^{y_{hkbr}}\right]\prod_{z=0}^{|\mathbf{R}_{hk}|-1} P_{k,\mathbf{R}_{hk}(z,z+1)}\\ &=\sum_{r\in\mathbf{R}_{hk}} w_r\prod_{z=0}^{|\mathbf{R}_{hk}|-1} P_{k,\mathbf{R}_{hk}(z,z+1)}\\ &\quad-\sum_{r\in\mathbf{R}_{hk}} w_r\prod_{b\in\mathbf{B}}\left(1-p_{kbr}\right)^{y_{hkbr}}\prod_{z=0}^{|\mathbf{R}_{hk}|-1} P_{k,\mathbf{R}_{hk}(z,z+1)}\end{aligned} \qquad (20)$$

$$\text{Min.}\ \sum_{r\in\mathbf{R}_{hk}} w_r\prod_{b\in\mathbf{B}}\left(1-p_{kbr}\right)^{y_{hkbr}}\prod_{z=0}^{|\mathbf{R}_{hk}|-1} P_{k,\mathbf{R}_{hk}(z,z+1)} \qquad (21)$$

Min.

$$\sum_{r\in\mathbf{R}_{hk}} w_r\sum_{b\in\mathbf{B}} y_{hkbr}\ln\left(1-p_{kbr}\right)\sum_{z=0}^{|\mathbf{R}_{hk}|-1}\ln P_{k,\mathbf{R}_{hk}(z,z+1)} \qquad (22)$$

유전자로부터 제공된 공격편대군별 구성형태, 무장

보유량, 할당된 표적들의 공격순서 등에 대한 정보를 바탕으로, 목적함수 식 (22)와 제약식 식 (23)과 (24)를 갖는 WTA의 최적해를 탐색한다. 모든 공격편대군에 대해 이러한 과정을 수행한 후 원 목적함수 식 (2)를 계산한다.

$$1 \le \sum_{b \in \mathbf{B}} y_{hkbr} \le \mathrm{B}_r^{\max},\ r \in \mathbf{R}_{\mathrm{hk}} \tag{23}$$

$$\sum_{r \in \mathbf{R}_{hk}} y_{hkbr} \le q_{kb},\ b \in \mathbf{B} \tag{24}$$

3.2.2 벌금함수

벌금함수는 제약을 위반한 개체의 적합도가 저평가되도록 하여 실행불가능(Infeasible) 해보다 실행가능(Feasible) 해를 우선하도록 한다. 본 연구에서는 세대가 진화될수록 제약을 엄격하게 고려하는 식 (25)의 적응형(Adaptive) 벌금함수를 이용하였다. 이는, 진화 초기에는 제약을 위반하였으나 좋은 유전형질을 가진 개체를 보호하여 좋은 유전형질이 다음 세대에 상속되도록 하고, 진화세대 최종에는 실행가능한 최선해가 제공되도록 한다.

$$p(x) = 1 + \left(\frac{g}{G}\right) \sum_{c=1}^{3} \alpha_c V_c \tag{25}$$

여기서,

g, G : 각각 현 세대수와 총 세대수
c : 제약(1 : 기종별 쏘티, 2 : 무장, 3 : 비행시간)
V_c : 제약 c를 위반한 공격편대군 수
α_c : 제약별 가중치($\alpha_1 = 0.4,\ \alpha_2 = \alpha_3 = 0.3$)

3.3 선택(Selection)

선택 연산자는 적합도 평가 결과를 바탕으로 현 세대(Generation)의 모집단 중 다음 세대에 물려줄 개체를 선택하는 과정이다. 본 연구에서는 세대별 우수한 해의 생존성을 보장하되 적합도가 낮은 해에게도 확률적으로 생존 기회를 부여하는 룰렛 휠(Roulette wheel) 방법과 현 세대의 최선해를 다음 세대에 원형대로 상속하는 엘리티스트 보전 전략(Elitist preserving strategy)을 혼합한 'Elitist-roulette wheel'을 적용하였다.

3.4 교차(Crossover)

교차는 부모(Parent)의 유전형질을 조합하여 새로운 자손(Offspring)을 생성하는 과정이다. 본 연구의 문제에서는 표적별 한 차례의 공격만 허용하는 식 (3)의 제약을 준수하기 위해 잠재해의 표적 공격순서를 표현하는 영역(Fig. 4의 Targets)에서 동일 표적이 중복되지 않도록 하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 잠재해를 두 부분으로 나누어 교차 연산을 수행하였다. 첫 번째, 표적 공격순서와 공격편대군별 표적 개수에 대한 두 영역에 대해서는 Yuan *et al.*[42]이 제안한 TCX (Two-part chromosome crossover) 방법을 이용하였으며, TCX의 연산절차는 Fig. 6과 같다. 두 번째 부분으로, 공격편대군 구성형태 영역에 대해서는 Fig. 7과 같은 2점 교차(2-point crossover) 방법을 적용하였다.

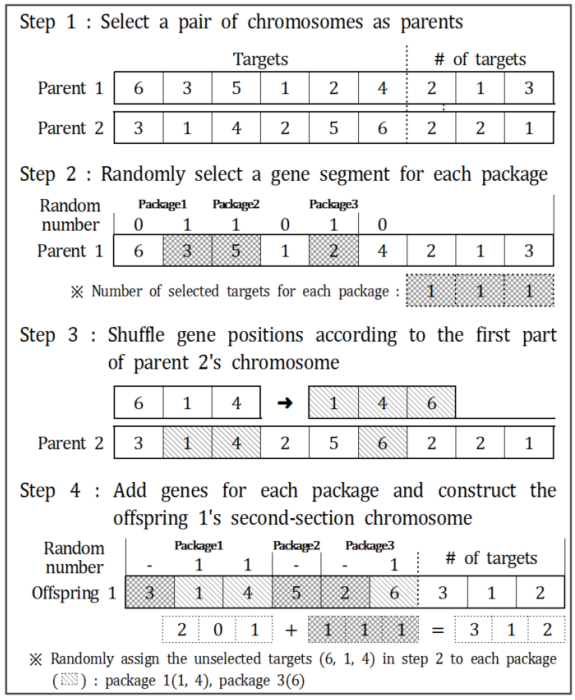


Fig. 6. Two-part chromosome crossover

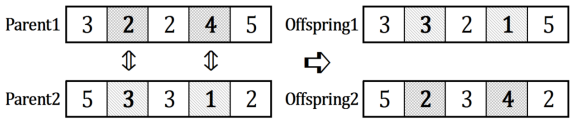


Fig. 7. 2-point crossover

3.5 돌연변이(Mutation)

돌연변이는 교차 연산을 통해 생성된 유전자들 중 돌연변이율(Mutation rate)에 따라 임의적으로 유전자

를 선택하고 그들의 일부 염색체를 변화시켜 새로운 형질의 유전자를 생성하는 과정이다. 이는 지역 최적해를 탈출하여 다른 공간을 탐색할 수 있는 기회를 제공한다. 본 연구는 Fig. 4에서의 영역구분에 따라 Fig. 8과 같이 한 유전자에서 임의로 2개의 염색체를 선정하여 이들의 위치를 교체하는 2점 교환(Two-point exchange) 방법과 임의적으로 한 염색체를 수정하는 1점 돌연변이(1-point mutation) 방법을 적용하였다.

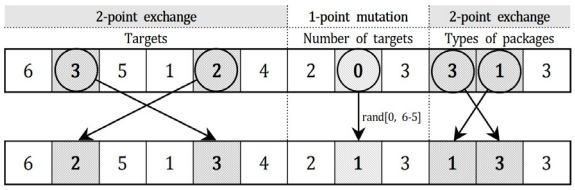


Fig. 8. Mutation operators

3.6 이주(Migration)

이주는 병렬 알고리즘의 핵심적인 단계로, 각 단위 HGA들이 지정된 세대수 동안 탐색한 우수해를 상호 교환하는 단계이다. 본 연구는 모든 단위 HGA들이 탐색한 우수해 정보를 활용하기 위해 Fig. 9와 같은 Fully-connected topology 방법을 이용하였다. 이주는 이주율(Migration rate)에 따라 각 단위 HGA의 우수해를 선별하여 우수해 집합을 구성하고, 각 HGA의 적합도가 저조한 열등해들을 우수해 집합으로 대체하는 절차로 수행된다.

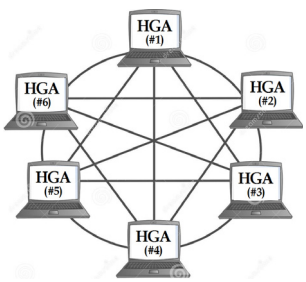


Fig. 9. Fully-connected topology

4. 수치실험

4.1 수치실험 데이터

수치실험 예제는 항공기 4종, 무장 5종으로 편성되는 공격편대군 8종과 표적 15개로 구성하였으며, 실험에 사용한 데이터는 Table 1과 같다. 또한, 무장-표적 간 파괴확률, 공격편대군의 표적 이동 간 생존확률에 대한 데이터는 부록(Appendix)에 제시하였다.

Table 1. Input data for packages and target

(a) Strike packages

Package(k)	Aircraft(a)				Munition(b)					T_k
	A_1	A_2	A_3	A_4	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	
1	-	2	2	2	-	-	1	1	2	1
2	-	2	2	2	-	1	1	2	1	1
3	-	3	3	2	-	-	2	1	1	1
4	-	3	3	2	-	1	2	1	-	1
5	2	-	3	2	1	1	-	1	1	0.8
6	2	-	3	2	-	-	1	2	1	0.8
7	-	2	2	3	-	1	2	1	1	1
8	-	2	2	3	-	1	1	1	1	1
S_a/Q_b	6	11	13	12	3	4	8	7	6	

(b) Locations of base and targets

Node		Location	w_i	Node		Location	w_i
Base(0)		(20, -4)	-	Target	8	(17, 15)	67
Target	1	(10, 5)	81		9	(11, 19)	77
	2	(17, 7)	79		10	(21, 19)	56
	3	(20, 10)	91		11	(14, 22)	62
	4	(11, 10)	100		12	(25, 21)	85
	5	(19, 12)	73		13	(20, 24)	61
	6	(8, 16)	70		14	(27, 27)	72
	7	(12, 15)	90		15	(33, 27)	83

4.2 수치실험 결과

수치실험은 i5-3210M 2.5GHz CPU와 4GB RAM 노트북에서 수행되었으며, HPGA는 MATLAB으로 구현되었다. 각 PHGA에 적용된 파라미터들은 Table 2와 같으며, PHGA를 통해 탐색된 최선해는 Table 3과 같다. 공격계획은 Type 2, Type 3 각 1개 편대와 Type 4 3개 편대로 구성하여 총 13개 표적을 공격하며, 예상되는 공격효과는 778.5612로 나타났다. 항공기들의 작전가능 쏘티, 무장 보유량의 제한으로 표적 T_{11}, T_{14}는 공격대상에서 제외되었다. 예를 들어, 첫 번째 공격편대군은 항공기 A_2, A_3, A_4가 각 2대씩으로 구성되며, M_2, M_3, M_5 각 1발과 M_4 2발을 장착하고 표적 T_8,

T_{15}, T_{13}을 순차적으로 공격한다. 여기서, 표적 T_8 공격 시 무장 M_4 2발과 M_5 1발을 사용한다. 즉, 기존 연구들은 하나의 표적에 한 종류의 무장을 사용하도록 제한하나, 본 연구는 혼합 무장을 사용할 수 있도록 보다 현실화하였다.

Table 2. PHGA parameters

(a) Parameters for unit HGA

Population	Crossover rate	Mutation rate
50 individuals	0.7 (70 %)	0.2 (10 %)

(b) Migration parameters

Times	Period	Rate
2 (Twice)	30 generations	0.06 (6 %)

Table 3. Experimental result

Package	Operation plan
Type 2	Base → $T_8(2/M_4,\ 1/M_5)$ → $T_{15}(1/M_2)$ → $T_{13}(1/M_3)$ → Base
Type 4	Base → $T_6(1/M_5)$ → $T_9(1/M_2)$ → $T_{10}(2/M_3)$ → Base
Type 4	Base → $T_3(1/M_4)$ → $T_5(1/M_2,\ 2/M_3)$ → Base
Type 3	Base → $T_7(1/M_4,\ 1/M_5)$ → $T_{12}(2/M_3)$ → Base
Type 4	Base → $T_4(2/M_3)$ → $T_1(1/M_4)$ → $T_2(1/M_2)$ → Base

수치실험 예제에 대해 Table 2의 파라미터를 갖는 PHGA를 5회 실행한 결과, 계산시간(CPU time)은 평균 약 7,688초(약 2.13시간), 표준편차는 27.38초였다. 계산시간을 세부적으로 분석해 보면, MATLAB과 CPLEX와 연동을 통한 표적별 무장 할당이 포함된 적합도 평가에 99.9 % 이상이 소요되었다. 이는, 모집단 기반 알고리즘의 특성 상 적합도 함수에 대한 연산이 많음에 기인하며, 본 연구의 실험예제의 경우, 총 22,500회(HGA 5개 × 50개체 × 총90세대)였다. 따라서 공격편대군별 공격경로가 사전에 결정된 경우, 즉, 표적별 무장 할당만을 다루는 기존의 WTA 문제에서 공격경로에 대한 결정변수가 추가됨으로써 상당한 계산 비용을 야기하게 되었음을 의미한다.

Fig. 10은 PHGA의 해 탐색과정의 예시를 보여주고 있다. 첫 번째 이주단계에서는 5개의 HGA 중 1번째 HGA가 최선해를 제공하였으며, 이주를 통해 공유된 각 HGA의 우수해들을 바탕으로 30세대 간 새롭게 해를 탐색한 결과, 두 번째 이주단계에서는 2번째 HGA가 최선해를 제공하였으며, 이후 모든 HGA가 더 우수한 해를 탐색할 수 없어 수렴되었다. 결과적으로, 각 단위 HGA는 이주를 통해 다른 HGA들의 좋은 해를 받아들임으로써 모집단의 다양성을 증대시키고, 지역 최적해로부터의 탈출할 수 있는 기회를 얻게 된다. 이는, 알고리즘의 병렬화를 통해 보다 넓은 영역에서 해를 탐색하도록 유도함으로써 보다 우수한 해를 탐색할 수 있는 가능성을 향상시킬 수 있음을 의미한다.

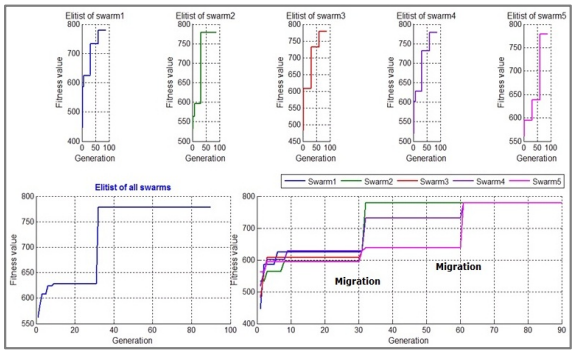


Fig. 10. The example of PGA search process

5. 결 론

본 연구는 공군작전 최적화를 위한 기존 연구들의 공격편대군 생존확률 평가 방법과 임의 표적 공격에 혼합 무장 사용 등 현실적인 사항들을 개선한 새로운 수리모형을 제시하였으며, 합리적인 시간 내에 문제를 해결하기 위한 해법으로 메타 휴리스틱 기법과 최적해법을 혼합하여 이용하는 병렬 하이브리드 유전자 알고리즘(PHGA)을 제안하였다. 수리모형은 공격편대군의 비행경로가 생존확률에 영향을 미치기 때문에 차량경로문제(VRP)와 무기-표적 할당(WTA) 개념을 통합한 형태의 혼합정수계획모형(MIP)으로 제시되었다. 또한, 공군 작전계획 수립에 응용하는 수치실험을 통해 수리모형의 해가 제공하는 정보들의 효용성을 살펴보았다.

향후 연구로는, 본 연구와 같이 최적해를 보장받을

수 없는 메타 휴리스틱을 이용하는 경우, 현실 작전에서는 임의의 편대군에 인접한 표적들이 할당될 가능성이 높으므로 표적들에 대한 군집화(Clustering) 기법 등을 적용한다면 모집단의 크기 감소를 통해 계산시간 단축과 안정적이고 향상된 품질의 해를 도출할 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 공격경로 상에서의 누적 생존확률 평가 등을 선형화한다면, 기존의 효율적인 최적 해법을 적용할 수 있어 계산시간이 상당히 단축되고 제공되는 정보의 가치가 높은 수리모형이 될 수 있을 것이다. 마지막으로, 최근 전쟁양상과 작전수행 형태를 고려할 때, 지대지, 공대지, 함대지 무기 등을 고려한 지·해·공군의 합동작전 환경에서의 표적 할당에 대한 연구가 필요하겠다.

후 기

본 연구는 방위사업청, ㈜아레스와 한길C&C㈜의 '항공무장 효과도 분석모델 체계개발 사업(계약번호 제20154130781호)'의 지원으로 수행되었기에 감사의 마음을 표합니다.

References

[1] A. S. Manne, "A Target-Assignment Problem," Operations Research, Vol. 6, No. 3, pp. 346-351, 1958.

[2] B. J. Griggs, "An Air Mission Planning Algorithm for a Theater Level Combat Model," M.S. Thesis, Graduate School of Engineering, Air Force Institue of Technology, 1994.

[3] D. R. Castro, "Optimization Models for Allocation of Air Strike Assets with Persistence," M.S. Thesis, Naval Postgraduate School, 2002.

[4] D. R. Lee and J. Yang, "The Optimal Allocation of Aircrafts to Targets by Using Mixed Integer Programming", Korean Management Science Review, Vol. 25, No. 1, pp. 55-74, 2008.

[5] B. J. Griggs, G. S. Parnell and L. J. Lehmkuhl, "An Air Mission Planning Algorithm using Decision Analysis and Mixed Integer Programming," Operations Research, Vol. 45, No. 5, pp. 662-676, 1997.

[6] J. J. Heo and C. Y. Kim, "A Study of Optimal Aircraft Allocation Model for Attacking Fixed Target," Military Operations Research Society Of Korea, Vol. 12, No. 2, pp. 22-36, 1986.

[7] B. J. Jeong and C. Y. Kim, "Aircraft Allocation Model : Application of the Goal Programming," Military Operations Research Society Of Korea, Vol. 20, No. 1, pp. 49-79, 1994.

[8] V. C. Li, G. L. Curry and E. A. Boyd, "Towards the Real Time Solution of Strike Force Asset Allocation Problems," Computers & Operations Research, Vol. 31, No. 2, pp. 273-291, 2004.

[9] J. M. Rosenberger, H. S. Hwang, R. P. Pallerla, A. Yucel, R. L. Wilson and E. G. Brungardt, "The Generalized Weapon Target Assignment Problem," 10th International Command and Control Research and Technology Symposium, McLean, VA, June 13-16, 2005.

[10] M. Ash, "Flood's Assignment Model for Small Kill Levels," Operations Research, Vol. 7, No. 2, pp. 258-260, 1959.

[11] R. H. Day, "Allocating Weapons to Target Complexes by Means of Nonlinear Programming," Operations Research, Vol. 14, No. 6, pp. 992-1013, 1966.

[12] Y. Owechko and S. Shams, "Comparison of Neural Network and Genetic Algorithms for a Resource Allocation Problem", IEEE World Congress on Computational Intelligence, Vol. 7, pp. 4655-4660, 1994.

[13] J. D. Katter, "A Solution of the Multi-Weapon, Mult-Target Assignment Problem," Working Paper 26957, MITRE, McLean, VA.

[14] S. C. Chang, R. M. James and J. J. Shaw, "Assignment Algorithm for Kinetic Energy Weapons in Boost Defense," In Proceedings of IEEE 26th Conference Decision and Control, Los Angeles, CA, pp. 1678-1683, 1987.

[15] D. Orlin, "Optimal Weapons Allocation against Layered Defenses," Naval Research Logistics, Vol. 34, No. 5, pp. 605-616, 1987.

[16] J. Lee and M. Shin, "Stochastic Weapon Target Assignment Problem under Uncertainty in Targeting

Accuracy," Journal of Korea Operations Research and Management Science, Vol. 41, No. 3, pp. 23-36, 2016.

[17] O. Kwon, D. Kang, K. Lee and S. Park, "Lagrangian Relaxation Approach to the Targeting Problem," Naval Research Logistics, Vol. 46, No. 6, pp. 640-653, 1999.

[18] D. Ahner and C. Parson, "Weapon Tradeoff Analysis using Dynamic Programming for a Dynamic Weapon Target Assignment Problem Within a Simulation," Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference - Simulation: Making Decisions in a Complex World, pp. 2831-2841, 2013.

[19] C. R. Parson, "Approximate Dynamic Programming for Military Resource Allocation," Ph.D. Thesis, Air Force Institute of Technology, 2014.

[20] R. K. Ahuja, A. Kumar, K. C. Jha and J. B. Orlin, "Exact and Heuristic Algorithms for the Weapon-Target Assignment Problem," Operations Research, Vol. 55, No. 6, pp. 1136-1146, 2007.

[21] Z. J. Lee, S. F. Su and C. Y. Lee, "A Genetic Algorithm with Domain Knowledge for Weapon-Target Assignment Problems," Journal of the Chinese Institute of Engineers, Vol. 25, No. 3, pp. 287-295, 2002.

[22] Z. J. Lee, S. F. Su and C. Y. Lee, "Efficiently Solving General Weapon-Target Assignment Problem by Genetic Algorithms with Greedy Eugenics," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B(Cybernetics), Vol. 33, No. 1, pp. 113-121, 2003.

[23] H. Lu, H. Zhang, X. Zhang and R. Han, "An Improved Genetic Algorithm for Target Assignment, Optimization of Naval Fleet Air Defense," 6th World Congress on Intelligent Control and Automation, Vol. 1, pp. 3401-3405, 2006.

[24] P. Li, W. Ling and F. Lu, "A Mutation-Based GA for Weapon-Target Allocation Problem Subject to Spatial Constraints," International Workshop on Intelligent Systems and Applications, pp. 1-4, 2009.

[25] L. Jinjun, C. Rong and X. Jiguangt, "Dynamic WTA Optimization Model of Air Defense Operation of Warships' Formation," Journal of Systems Engineering and Electronics, Vol. 17, No. 1, pp. 126-131, 2006.

[26] Z. J. Lee, C. Y. Lee and S. F. Su, "An Immunity-Based Ant Colony Optimization Algorithm for Solving Weapon-Target Assignment Problem," Applied Soft Computing, Vol. 2, No. 1, pp. 39-47, 2002.

[27] Y. Wang, L. Qian, Z. Guo and L. Ma, "Weapon Target Assignment Problem Satisfying Expected Damage Probabilities based on ant Colony Algorithm," Systems Engineering & Electronics, Vol. 19, No. 5, pp. 939-944, 2008.

[28] A. Tokgöz and S. Bulkan, "Weapon Target Assignment with Combinatorial Optimization Techniques," International Journal of Advanced Research in Artificial Intelligence, Vol. 2, No. 7, pp. 39-50, 2013.

[29] H. Naeem and A. Masood, "An Optimal Dynamic Threat Evaluation and Weapon Scheduling Technique," Knowledge-Based Systems, Vol. 23, No. 4, pp. 337-342, 2010.

[30] G. Shang, Z. Zaiyue, Z. Xiaoru and C. Cungen, "Immune Genetic Algorithm for Weapon-Target Assignment Problem," Workshop on Intelligent Information Technology Application(IITA 2007), 2007.

[31] Z. Song, F. Zhu and D. Zhang, "A Heuristic Genetic Algorithm for Solving Constrained Weapon-Target Assignment Problem," IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems, Vol. 1, pp. 336-341, 2009.

[32] D. L. Luo, C. L. Shen, B. Wang and W. H. Wu, "Air Combat Decision-Making for Cooperative Multiple Target Attack using Heuristic Adaptive Genetic Algorithm," International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Vol. 1, pp. 473-478, 2005.

[33] P. Toth and D. Vigo, "Vehicle Routing: Problems, Methods, and Applications(Vol. 18)," Siam, Philadelphia, 2014.

[34] I. Karaoglan, F. Altiparmak, I. Kara and B. Dengiz, "The Location-Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery: Formulations and a Heuristic

Approach," Omega, Vol. 40, No. 4, pp. 465-477, 2012.

[35] K. T. Kim and G. W. Jeon, "Hybrid Parallel Genetic Algorithm for Traveling Salesman Problem," Journal of Korea Safety Management & Science, Vol. 13, No. 3, pp. 107-114, 2011.

[36] Z. H. Ahmed, "An Experimental Study of a Hybrid Genetic Algorithm for the Maximum Traveling Salesman Problem," Mathematical Sciences, Vol. 7, No. 1, pp. 7-10, 2013.

[37] A. R. V. da Silva and L. S. Ochi, "An Efficient Hybrid Algorithm for the Traveling Car Renter Problem," Expert Systems with Applications, Vol. 64, No. 1, pp. 132-140, 2016.

[38] Ş. Gülcü, M. Mahi, Ö. K. Baykan and H. Kodaz, "A Parallel Cooperative Hybrid Method based on ant Colony Optimization and 3-Opt Algorithm for Solving Traveling Salesman Problem," Soft Computing, pp. 1-17, 2016.

[39] Y. Wang, "The Hybrid Genetic Algorithm with Two Local Optimization Strategies for Traveling Salesman Problem," Computers & Industrial Engineering, Vol. 70, pp. 124-133, 2014.

[40] B. Lin, X. Sun and S. Salous, "Solving Travelling Salesman Problem with an Improved Hybrid Genetic Algorithm," Journal of Computer and Communications, Vol. 4, pp. 98-106, 2016.

[41] H. Kim, "Optimization Methodology for Determining the Locations of Logistics Support Units and Supply Line," Journal of the Korean Society of Supply Chain Management, Vol. 16, No. 2, pp. 35-45, 2016.

[42] S, Yuan, B. Skinner, S. Huang and D. Liu, "A New Crossover Approach for Solving the Multiple Travelling Salesmen Problem using Genetic Algorithms," European Journal of Operational Research, Vol. 228, No. 1, pp. 72-82, 2013.

Appendix

Table 5. Survival probability of package(Type 1~4)

j \ i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	1	0.954	0.961	0.953	0.944	0.946	0.923	0.931	0.936	0.918	0.924	0.912	0.916	0.908	0.896	0.890
1	0.914	1	0.974	0.961	0.981	0.961	0.961	0.965	0.958	0.952	0.940	0.941	0.927	0.929	0.909	0.896
2	0.921	0.934	1	0.246	0.976	0.980	0.957	0.967	0.972	0.954	0.957	0.948	0.946	0.942	0.926	0.916
3	0.913	0.921	0.236	1	0.968	0.990	0.954	0.967	0.979	0.957	0.968	0.954	0.959	0.953	0.939	0.929
4	0.904	0.941	0.936	0.928	1	0.971	0.976	0.196	0.972	0.968	0.954	0.958	0.940	0.944	0.923	0.909
5	0.906	0.921	0.940	0.950	0.931	1	0.960	0.973	0.986	0.963	0.974	0.961	0.963	0.959	0.943	0.932
6	0.883	0.921	0.917	0.914	0.936	0.920	1	0.984	0.968	0.984	0.955	0.970	0.941	0.951	0.927	0.910
7	0.891	0.925	0.927	0.927	0.188	0.933	0.944	1	0.981	0.984	0.966	0.974	0.951	0.959	0.936	0.920
8	0.896	0.918	0.932	0.939	0.932	0.946	0.928	0.941	1	0.974	0.979	0.973	0.965	0.967	0.947	0.933
9	0.878	0.912	0.914	0.917	0.928	0.923	0.944	0.944	0.934	1	0.965	0.984	0.952	0.964	0.940	0.923
10	0.884	0.900	0.917	0.928	0.914	0.934	0.915	0.926	0.939	0.925	1	0.280	0.983	0.981	0.965	0.951
11	0.872	0.901	0.908	0.914	0.918	0.921	0.930	0.934	0.933	0.944	0.268	1	0.962	0.977	0.953	0.935
12	0.876	0.887	0.906	0.919	0.900	0.923	0.901	0.911	0.925	0.912	0.943	0.922	1	0.979	0.977	0.965
13	0.868	0.889	0.902	0.913	0.904	0.919	0.911	0.919	0.927	0.924	0.941	0.937	0.939	1	0.973	0.955
14	0.856	0.869	0.886	0.899	0.883	0.903	0.887	0.896	0.907	0.900	0.925	0.913	0.937	0.933	1	0.978
15	0.850	0.856	0.876	0.889	0.869	0.892	0.870	0.880	0.893	0.883	0.911	0.895	0.925	0.915	0.938	1

※ Lower/Upper triangular matrix : Type 1, 2 / Type 3, 4

Table 6. Survival probability of package(Type 5~8)

j \ i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	1	0.934	0.941	0.933	0.924	0.926	0.903	0.911	0.916	0.898	0.904	0.892	0.896	0.888	0.876	0.870
1	0.884	1	0.954	0.941	0.961	0.941	0.941	0.945	0.938	0.932	0.920	0.921	0.907	0.909	0.889	0.876
2	0.891	0.904	1	0.241	0.956	0.960	0.937	0.947	0.952	0.934	0.937	0.928	0.926	0.922	0.906	0.896
3	0.883	0.891	0.228	1	0.948	0.970	0.934	0.947	0.959	0.937	0.948	0.934	0.939	0.933	0.919	0.909
4	0.874	0.911	0.906	0.898	1	0.951	0.956	0.192	0.952	0.948	0.934	0.938	0.920	0.924	0.903	0.889
5	0.876	0.891	0.910	0.920	0.901	1	0.940	0.953	0.966	0.943	0.954	0.941	0.943	0.939	0.923	0.912
6	0.853	0.891	0.887	0.884	0.906	0.890	1	0.964	0.948	0.964	0.935	0.950	0.921	0.931	0.907	0.890
7	0.861	0.895	0.897	0.897	0.182	0.903	0.914	1	0.961	0.964	0.946	0.954	0.931	0.939	0.916	0.900
8	0.866	0.888	0.902	0.909	0.902	0.916	0.898	0.911	1	0.954	0.959	0.953	0.945	0.947	0.927	0.913
9	0.848	0.882	0.884	0.887	0.898	0.893	0.914	0.914	0.904	1	0.945	0.964	0.932	0.944	0.920	0.903
10	0.854	0.870	0.887	0.898	0.884	0.904	0.885	0.896	0.909	0.895	1	0.274	0.963	0.961	0.945	0.931
11	0.842	0.871	0.878	0.884	0.888	0.891	0.900	0.904	0.903	0.914	0.259	1	0.942	0.957	0.933	0.915
12	0.846	0.857	0.876	0.889	0.870	0.893	0.871	0.881	0.895	0.882	0.913	0.892	1	0.959	0.957	0.945
13	0.838	0.859	0.872	0.883	0.874	0.889	0.881	0.889	0.897	0.894	0.911	0.907	0.909	1	0.953	0.935
14	0.826	0.839	0.856	0.869	0.853	0.873	0.857	0.866	0.877	0.870	0.895	0.883	0.907	0.903	1	0.958
15	0.820	0.826	0.846	0.859	0.839	0.862	0.840	0.850	0.863	0.853	0.881	0.865	0.895	0.885	0.908	1

※ Lower/Upper triangular matrix : Type 5, 6 / Type 7, 8

Table 7. Target failure probability by munitions

b \ i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
M_1	0.875	0.867	0.915	0.934	0.951	0.897	0.865	0.912	0.962	0.941	0.971	0.922	0.891	0.853	0.915
M_2	0.924	0.982	0.812	0.861	0.92	0.912	0.932	0.859	0.875	0.931	0.888	0.898	0.897	0.903	0.913
M_3	0.897	0.903	0.914	0.951	0.962	0.851	0.961	0.922	0.861	0.962	0.917	0.953	0.941	0.923	0.852
M_4	0.956	0.951	0.931	0.953	0.912	0.959	0.912	0.902	0.895	0.931	0.907	0.913	0.921	0.922	0.901
M_5	0.989	0.97	0.895	0.962	0.942	0.975	0.981	0.951	0.913	0.953	0.925	0.931	0.942	0.946	0.929