

하이브리드 ACS 알고리즘을 이용한 군 비행단 제설작전 방법연구

최정록* · †김각규** · 이상헌**

A Study on Methodology of the Snow Removal Operation of Air Wing Using Hybrid ACS Algorithm

Jung-Rock Choi* · †Gak-Gyu Kim** · Sang-Heon Lee**

■ Abstract ■

The vehicle routing problem (VRP) can be described as a problem to find the optimum traveling routes from one or several depot (s) to number of geographically scattered customers. This study executes a revised Heterogeneous Vehicle Routing Problem (HVRP) to minimize the cost that needs to conduct efficiently the snow removal operations of Air Wing under available resources and limited operations time. For this HVRP, we model the algorithm of an hybrid Ant Colony System (ACS). In the initial step for finding a solution, the modeled algorithm applies various alterations of a parameter that presents an amount of pheromone coming out from ants. This improvement of the initial solution illustrates to affect to derive better result ultimately. The purpose of this study proves that the algorithm using Hybrid heuristic incorporated in tabu and ACS develops the early studies to search best solution.

Keywords : Ant Colony System, Tabu, Meta Heuristic, Heterogeneous Vehicle Routing Problem

논문접수일 : 2012년 11월 28일 논문게재확정일 : 2013년 03월 19일

* 공군 군수사령부, Air Force Logistics Command

** 국방대학교 군사운영분석학과

† 교신저자, keyperson78@naver.com

1. 서 론

동절기 폭설은 공군 전력의 대부분을 차지하는 항공기의 활주로 이착륙을 방해하여 항공작전 수행에 막대한 영향을 준다. 이에 공군은 동절기에 언제든지 전투기가 출격할 수 있도록 활주로 및 주 기장 제설을 하기 위하여 제설작전이라는 공군만의 특수한 작전을 수행하고 있다. 제한된 시간 내 이 작전을 수행하기 위하여 수명을 다해 원 기능 발휘가 어려운 항공기 기관을 개조된 일반차량에 탑재하여 엔진 열기와 배출되는 바람의 힘으로 제설을 하도록 특수 제작된 중·소형의 다목적 제설차(SE-88P/F, 이하 제설차)라는 특수한 장비를 사용하고 있다.

그러나 지금까지의 제설작전은 특정 경로 없이 경험을 바탕으로 작업을 수행하여 불필요한 추가작업 발생으로 활주로의 작전 가능상태 회복을 지연시킬 뿐만 아니라 불필요한 차량 이동 및 엔진 사용으로 장비 수명 단축과 추가 운영비용을 발생시켰다.

본 연구의 목적은 동계 강설로 인하여 공군작전이 원활하지 못하거나 마비시 제한된 시간 내에 비용을 절약한 제설작업을 통해 조기 작전가능 상태로 회복하고 지속 유지하는데 있으며 공군의 제한된 가용자원과 최소의 비용으로 제설작전을 수행할 수 있도록 하는 경로문제[8]를 다룬다. 이를 위하여 총 비용을 고려한 다용량 차량경로문제(Heterogeneous Vehicle Routing Problem, 이하 HVRP)의 변형 문제를 제시하고 문제를 효과적으로 풀 수 있는 개미군집시스템(Ant Colony System, 이하 ACS) 알고리즘과 타부서치 알고리즘이 조합된 하이브리드 ACS 알고리즘을 제안하여 기존의 유사연구에서 얻은 결과보다 개선된 해 도출을 통하여 제안한 알고리즘의 효율성을 입증하고 군사문제에 적용한다. 군사문제에서는 비행단 내 제설작업이 필요한 구역을 설정하고 공군이 운영 중인 제설차를 조건에 맞게 운행하여 제한된 시간 내에 작전을 수행하는 최소 비용을 산출한다. 이는 지점간 차량의 이동비용 뿐만 아니라 지점 내에서의 제설작업 중 소요되는 차량 운행비, 엔진 가동 연료비

등 종합적인 비용을 고려하여 최적의 이동경로 및 차량을 분배한다.

본 연구에서 제안하는 하이브리드 ACS 알고리즘에서 전역 최적경로의 길이가 주어진 반복 사이클 횟수 동안 더 이상 향상되지 못하면 지역 최적에 빠졌다고 평가하고 상태전이 규칙에서 파라미터 감소를 통해 다음 노드를 선택하는 다양화 전략을 사용하여 기존의 제시된 방법보다 우수함을 실험하였다.

알고리즘은 Visual Studio 2010 C++에서 구현하고, 기존 알고리즘을 통해 산출된 TSP 기본예제 및 기연구된 HVRP 문제를 실험하여 제안된 알고리즘의 효율성을 입증한 후 개선된 알고리즘을 제설작전에 적용하여 총 비용을 고려한 HVRP의 변형 문제로 실제실험을 하였다.

본 연구는 다음과 같이 구성되어 있다. 제 2장에서는 제안된 문제에 대한 수리모형을 수립하고, 제 3장에서는 하이브리드 ACS 알고리즘을 제안한다. 제 4장에서는 알고리즘의 수치실험 후 군사문제에 적용하고 마지막으로 제 5장에서는 결론 및 향후 연구방향을 제안한다.

2. 수리모형

2.1 제설작전 운영개념

공군작전은 악기상시 작전 수행이 크게 제한되는 등 육군과 해군보다 많은 기상 영향의 영향을 받는다. 이러한 이유에서 공군은 동절기에 제설작전이라는 특수한 작전을 수행하고 있다. 제설작전은 항공기의 출격 가능성을 목적으로 이루어지기 때문에 최단시간 내에 완료되어야만 하며 공군에서 요구하는 작업시간은 완전작전¹⁾을 기준으로 적설량 등급별로 1시간 50분~3시간이 소요된다.

제설작전은 활주로나 넓은 지역적 특성과 신속한 작전가능 능력을 확보하기 위하여 제설차라는 특수 제설장비를 제작 및 개조하여 운영하고 있다.

1) 비행단 전 항공기 일반비행 임무 수행가능 상태.

제설차는 현재는 폐기된 전투기의 엔진을 개조해 만든 것으로 엔진에서 뿜어 나오는 강한 열(380℃)과 배기가스로 활주로에 쌓여있는 눈과 얼음을 짧은 시간 내에 녹여버리는 장비로 중형 제설차(SE-88P)와 소형 제설차(SE-88F)가 있으며, 1회 작업 가능 면적(제설 폭)은 중형 제설차가 소형 제설차보다 약 2배 정도 우수하다. 제설작업의 대상인 비행단 내부는 활주로, 유도로, 주기장, 격납고 등으로 구성되어 있으며 활주로 및 주기장은 폭이 넓어 소형 제설차뿐만 아니라 중형제설차의 운행이 가능하나, 유도로 및 격납고 출입구는 폭이 좁아 중형 제설차의 운행이 불가능하다.



○ : 중형 및 소형 제설차 작전가능 지역
 ○ : 소형 제설차 작전가능 지역

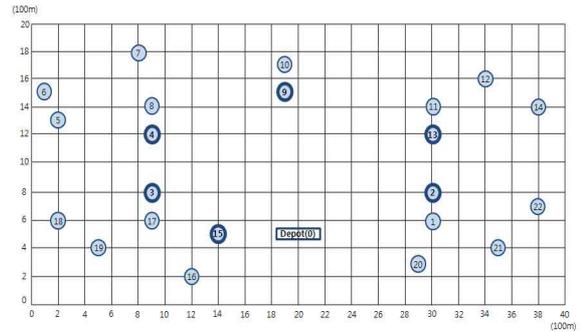
<그림 1> 제설작전 구역

제설작업이 필요한 구역을 일반 비행장을 기준으로 도로 폭을 고려하여 구분하면 <그림 1>과 같고 이 중 실선은 작업지점의 폭이 넓어 중형 및 소형 제설차 모두 작업이 가능한 지점이며, 점선은 소형 제설차만 출입이 가능한 지역을 의미한다.

2.2 모형정의 및 가정 사항

본 연구에서 구성하고자 하는 VRP의 모형[9]은 전체 수요지점상에 22개의 작업지점이 있고, 모든 작업지점의 작업량을 충족시킬 수 있는 유일한 공급지인 Depot을 중심으로 모형을 구축하였다. <그림 1>의 실제 비행단의 작업지점을 도식화하여 모형으로 나타내면 <그림 2>와 같다. 이 때, 2, 3, 4,

9, 13, 15번 굵은 선의 지점은 중형 제설차가 출입할 수 있음을 나타낸다.



<그림 2> 작업지점의 도식화 모형

각 작업지점의 위치와 작업면적은 <표 1>과 같으며 차량이 방문하는 지점의 작업요구량의 합은 엔진 최대 가동시간 등 차량의 작업능력을 초과하지 않는다. 이 때, 차량의 총 운행비는 차량의 고정비와 운행거리에 따른 연료비 등의 변동비 합이 최소화 되도록 한다.

본 연구는 기존의 HVRP 문제[3, 5]를 기본으로 총 비용의 최소화와 차량의 제한적 방문이라는 새로운 접근방식의 VRP로 모형으로 가정사항은 다음과 같다.

<가정 사항>

- 첫째, 차량의 출발 및 종착은 단일 depot에서만 이루어진다.
- 둘째, 동일지점을 두 대의 차량이 방문할 수 없다.
- 셋째, 지점 간 이동거리와 이동비용은 비례한다.
- 넷째, 차량운행에 따른 총 운행비용은 고정비와 변동비의 합으로 계산하고 고정비는 차량의 감가상각비, 변동비는 차량 및 항공유 연료비로 한정한다.
- 다섯째, 각 차량경로에 포함된 작업지점의 작업량 합은 항공유 급유량 및 엔진 최대 가동시간 등 엔진 최대 작업능력을 초과할 수 없다.
- 여섯째, 차량의 항공유 급유량은 차종별로 상

- 이하며, 총 수요량보다 많은 차량을 보유한다.
- 일곱째, 제설차는 차량연료보다 엔진 가동용 항공유가 상대적으로 중요하므로 차량 연료는 어느 장소에서나 주유가 가능한 것으로 가정한다.
- 여덟째, 모든 작업은 제설작전 소요시간 중 완전 작전가능 시간 내에 이루어져야 한다.
- 아홉째, 작업지점의 좌표는 도식화한 지점의 정중앙점을 기준으로 한다.
- 열째, 작업간 차량 정비소요는 없다.

2.3 변수정의 및 모형구성

2.3.1 변수정의

- N : 작업지점 집합, $N = \{0, 1, 2, \dots, n\}$,
- 0 : depot
- P : 작업지점의 전체집합
- S : 작업지점의 부분집합, $S_s, S_l \subset S$
 - S_s : 소형차량만 진입 가능한 지점
 - S_l : 소형 및 중형차량이 진입 가능한 지점
- V : 차량집합, $V_s \cup V_l = V$
 - V_s : 소형차량, V_l : 중형차량
- Q_v : 차량 v 의 항공유 급유량, $v \in V$
- T_v : 차량 v 의 엔진 최대 가동 가능시간, $v \in V$

- q_{jv} : 지점 j 에서 v 차량의 항공유 사용량, $j \in N, v \in V$
- t_{iv} : 지점 i 에서 v 차량의 엔진 가동시간, $i \in N, v \in V$
- d_{ij} : 지점 i 와 j 간 이동거리, $i, j \in N$
- k_i : 지점 i 내에서의 이동거리, $i \in N$
- f_v : 차량 v 의 고정비(차량 감가상각비), $v \in V$
- g_v : 차량 v 의 변동비(차량 연료), $v \in V$
- h_v : 차량 v 의 변동비(항공유), $v \in V$

결정변수는 다음과 같다.

$$x_{ijv} = \begin{cases} 1, & \text{차량 } v \text{가 지점 } i \text{에서 } j \text{까지 이동시, } i \neq j \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$y_{iv} = \begin{cases} 1, & \text{차량 } v \text{가 지점 } i \text{에서 작업 수행시} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

2.3.2 모형구성

$$Min \left\{ \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N \sum_{v=1}^V (d_{ij}g_v)x_{ijv} + \sum_{i=0}^N \sum_{v=1}^V (k_i g_v)y_{iv} + \sum_{i=0}^N \sum_{v=1}^V (k_i h_v)y_{iv} \right\} \quad (1)$$

$$+ \sum_{i=0}^N \sum_{j=1}^N \sum_{v=1}^V f_v (d_{ij}x_{ijv} + k_i y_{iv})$$

subject to

$$\sum_{i=0}^N \sum_{v=1}^V x_{ijv} = 1 \quad \forall j \in N \quad (2)$$

<표 1> 작업지점의 위치와 작업면적

(unit : m)

Node	Position	Area (W×L)	Medium Vehicle	Node	Position	Area (W×L)	Medium Vehicle
0	(2,000, 500)	depot		12	(3,400, 1,600)	250 × 90	×
1	(3,000, 600)	1,300 × 30	×	13	(3,000, 1,200)	1,500 × 60	○
2	(3,000, 800)	1,500 × 60	○	14	(3,800, 1,400)	20 × 50	×
3	(900, 800)	1,500 × 60	○	15	(1,400, 500)	400 × 150	○
4	(900, 1,200)	1,500 × 60	○	16	(1,200, 200)	100 × 50	×
5	(200, 1,300)	30 × 60	×	17	(900, 600)	1,300 × 30	×
6	(100, 1,500)	60 × 80	×	18	(200, 600)	30 × 80	×
7	(800, 1,800)	180 × 130	×	19	(500, 400)	180 × 90	×
8	(900, 1,400)	1,300 × 30	×	20	(2,900, 300)	180 × 90	×
9	(1,900, 1,500)	300 × 120	○	21	(3,500, 400)	120 × 90	×
10	(1,900, 1,700)	80 × 30	×	22	(3,800, 700)	20 × 50	×
11	(3,000, 1,400)	1,300 × 30	×				

$$\sum_{j=0}^N \sum_{v=1}^V x_{ijv} = 1 \quad \forall i \in N \quad (3)$$

$$\sum_{i=0}^N x_{ijv} - \sum_{l=0}^N x_{jlv} = 0 \quad \forall j \in N, \quad \forall v \in V \quad (4)$$

$$\sum_{i \in S_j} \sum_{v \in S} x_{ijv} \leq |S| - 1 \quad \forall S \subseteq P, \quad \forall v \in V \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^N q_{iv} y_{iv} \leq Q_v \quad \forall v \in V \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^N t_{iv} x_i \leq T_v \quad \forall v \in V \quad (7)$$

$$\sum_{v=1}^V y_{iv} = 0 \quad \forall S_s \text{ and } i \in S_s \quad (8)$$

$$\sum_{v=1}^V y_{iv} = 1 \quad \forall S \text{ and } i \in P \quad (9)$$

$$x_{ii} = 0 \quad \forall i \in N \quad (10)$$

$$x_{ijv}, y_{iv} \in \{0, 1\} \quad i, j = 0, \dots, N \quad v = 1, \dots, V \quad (11)$$

위 수리모형의 목적식 (1)은 차량의 총 운행비용을 최소화하는 것으로 앞의 목적식 3개항은 변동비를, 마지막은 고정비를 나타낸다. 식 (2)와 식 (3)은 각 지점에 한 대의 차량만 방문할 수 있음을 의미한다. 식 (4)는 제설차가 임의의 작업지점에 도착하면 작업을 마친 후 반드시 다른 작업지점으로 출발해야 한다는 차량 흐름의 연속성을 나타내며 식 (5)는 부분경로(sub-tour) 방지를 위한 조건으로 각 차량에 의해 형성되는 경로들은 반드시 depot에서 최초로 출발하고, 최종적으로 depot으로 귀환함을 의미하고 식 (6)은 각 지점에서 작업에 사용되는 항공유는 차량에 급유된 항공유량을 벗어날 수 없음을 의미한다. 식 (7)은 각 지점에서 소요되는 엔진 가동시간이 엔진 최대 가동시간을 초과할 수 없음을 의미하며 식 (8)과 식 (9)는 중형차량은 소형차량만 진입 가능한 작업지점에 진입할 수 없고 소형차량은 모든 작업지점에 진입할 수 있음을 의미한다. 식 (10)은 동일지점 간에는 이동할 수 없다는 조건이고 마지막으로 식 (11)은 정수조건이다.

3. 하이브리드 ACS

본 장에서는 기본적인 두 가지의 메타 휴리스틱

알고리즘을 이용한 발견적 알고리즘을 제시한다. 발견적 알고리즘은 2단계 절차로 구성되며, 1단계에서는 넓은 범위에 대해서 다양한 해 구성능력을 갖춘 ACS 알고리즘을 이용하여 초기경로를 산출하고, 2단계에서는 타부서치 기법을 이용하여 교점 교환 알고리즘을 제어하면서 개선해를 구하는 효과적인 알고리즘을 제시한다. 이러한 조합으로 알고리즘을 구성한 이유는 ACS 알고리즘이 일반적으로 전역탐색이 우수하여 최적해 부근에 빠르게 접근하지만 어느 정도 해 개선 이후에는 해의 수렴 현상이 발생하여 지역최적에 빠지기 쉽고 지역탐색 능력이 약하다는 문제가 지적되어 왔기 때문이며, 이러한 문제를 보완할 수 있고 지역탐색 중 지역 최적해로 빠지는 것을 조절할 수 있는 기법 중 하나가 타부서치 기법이기 때문이다.

또한 1단계인 ACS 알고리즘에서는 지역 최적해에 빠지는 것을 방지하고 지역탐색 능력을 강화하기 위하여 전역 최적경로의 길이가 주어진 반복 사이클 횟수(iteration) 동안 더 이상 향상되지 못하면 지역 최적에 빠졌다고 평가하고 상태전이 규칙에 파라미터 (α, β) 감소를 통해 다음 노드를 선택하는 방법인 파라미터 변경 ACS(Alteration Based ACS)를 사용하였다. 이 때, 새로운 최적경로를 탐색하게 되면 다시 기본 파라미터 값으로 바꾸며 이러한 노드 선택과 탐색과정을 종료 조건까지 계속 수행한다. 이것은 전역 최적경로 길이가 주어진 반복 횟수동안 향상되지 않으면 다음 경로 탐색의 상태전이 규칙에서 파라미터 (α, β) 를 감소시킴으로써 경로탐색이 가능하며 지역최적으로부터 벗어나는 효과가 있다. 즉, 탐색공간을 확장하는 역할을 수행한다.

2단계에서는 교점교환 후 경로의 최적여부를 판단하여 전역 최적경로에 대해서만 페로몬 전역갱신을 수행함으로써 전역 최적경로가 탐색되지 않으면 페로몬 증발만 일어나 주어진 종료조건을 만족할 때까지 아무리 많은 반복수행에도 페로몬 강화가 일어나지 않았던 기존의 ACS 알고리즘의 연구들을 보강한 발견적 기법을 사용하였다.

3.1 개미군집시스템(ACS)

ACS는 조합 최적화 문제를 해결하기 위해 개미 시스템(Ant System, 이하 AS) 알고리즘[11] 성능을 개선하여 Dorigo et al.[10]에 의해 소개되었으며, 실제 개미들이 먹이에서 집까지 가장 짧은 경로를 찾는 능력을 모방한 메타 휴리스틱 기법이다.

ACS는 m 개의 에이전트들이 초기화 규칙에 따라 무작위로 n 개의 노드를 선택한 다음, 각 에이전트들은 상태전이 규칙(state transition rule)에 따라 다음에 방문할 노드를 선택하고 계속해서 탐색 과정을 거친다. 상태전이 규칙을 적용하는 것은 탐색의 다양화를 보장하기 위한 방법이다. 이것은 먼저 발견된 우수해를 포함한 지역에 집중적으로 탐색하는 대신에, 더 멀리 검토되지 않은 지역으로 진행을 유도한다. 이러한 탐색과정을 거치는 동안 에이전트들은 지역갱신 규칙(local updating rule)에 따라 방문한 각 간선의 페로몬 양을 변경하게 된다. 그리고 일단 모든 에이전트들이 탐색과정을 마치게 되면 전역갱신 규칙(global updating rule)에 따라 다시 한 번 페로몬 양을 변경하게 된다. 결국, 각 에이전트들은 짧은 간선을 선택하려는 휴리스틱 정보와 많은 양의 페로몬을 가진 간선을 선택하려는 페로몬 정보에 따라 탐색경로를 완성하게 된다.

ACS 알고리즘은 기존의 AS 알고리즘과 달리 multi-start 노드 전이 규칙 및 페로몬 업데이트 규칙을 사용하는 것이 큰 차이점이다[2, 12]. 또한 기존의 AS 알고리즘과는 달리 최단거리를 찾는 개미의 경우에만 전역 페로몬 업데이트 규칙을 사용하여 자신의 경로에 페로몬을 증가시킨다.

ACS 알고리즘은 상태전이 규칙, 지역갱신 규칙, 전역갱신 규칙으로 구성된다.

먼저 개미들은 노드 r 에서 노드 u 로 이동할 때 식 (12)의 상태전이 규칙을 이용하여 노드를 이동한다.

$$s = \begin{cases} \arg \max_{u \in J_k(r)} [\tau(r, u)]^\alpha [\eta(r, u)]^\beta, & \text{if } q \leq q_0 \\ S, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

상태전이 규칙 s 에서 $\tau(r, u)$ 는 노드 r 과 u 사이 간선의 페로몬의 양, $\eta(r, u)$ 은 노드 r 과 u 의 거리의 역수이고, $J_k(r)$ 은 노드 r 에 있는 개미 k 가 방문할 수 있는 남아있는 노드들의 집합이다. 그리고 α, β 는 페로몬과 간선 길이의 상대적인 중요도를 결정하는 파라미터이다.

상태전이 규칙을 통하여 개미들이 각 노드들을 방문하는 동안 식 (13)의 지역갱신 규칙을 적용시켜 페로몬의 양을 갱신한다.

$$\tau(r, s) = (1 - \rho)\tau(r, s) + \rho\Delta\tau(r, s) \quad (13)$$

ρ ($0 < \rho < 1$)는 페로몬 유지율, $\Delta\tau(r, s) = \tau_0 = (n \times L_{nn})^{-1}$ 는 초기 페로몬 양이다. 여기서 L_{nn} 은 Nearest Neighbor의 구성형 해법에 의하여 생성된 경로길이, n 은 노드 수이다.

모든 개미들이 경로를 완성한 후에 전역갱신을 수행되는데, 그 중 전역 최적경로에 대해 식 (14)의 전역갱신 규칙을 적용한다.

$$\tau(r, s) = (1 - \rho)\tau(r, s) + \rho\Delta\tau(r, s) \quad (14)$$

where

$$\Delta\tau(r, s) = \begin{cases} L_{gb}^{-1}, & \text{if } (r, s) \in \text{global best tour} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

여기에서, L_{gb} 는 현재까지의 최적경로 길이이며 $\tau(r, s)$ 는 노드 r 과 노드 s 사이의 페로몬 양으로 만약 k 번째 개미의 경로 중에 간선(r, s)가 최적경로에 속해 있으면 $(1/L_{gb})$ 로 설정하고, 그렇지 않으면 0으로 설정한다. 그리고 파라미터 ρ 에 의해 페로몬 양은 점차 줄어들게 된다.

3.2 타부 서치(Tabu Search)

타부 서치는 Glover[13]에 의해 기본 개념이 정립되어 복잡한 해 영역에서 좋은 해를 얻기 위해 탐색을 유도하는 일반적인 발견적 기법 과정임과 동시에 다른 발견적 기법과정에서 사용할 수 있고 다른 발견적 기법과정을 제어할 수 있는 메타 휴리스틱 기법이다.

타부서치 과정에서 중요한 점은 타부목록을 사용함으로써 탐색접근은 ‘제한적인 탐색’을 하게 되고[1], ACS 알고리즘과 마찬가지로 상위수준의 발견적 해법으로 다른 발견적 해법에서 사용할 수 있고 다른 발견적 해법을 제어할 수 있다. 또한 타부서치는 해를 개선하는 움직임을 한쪽 방향으로만 고정하지 않고 이미 지나왔던 지역 최적해에 다시 빠지는 일 없이 탐색을 계속 진행시킨다[4, 6, 15].

타부서치의 가장 큰 특징은 타부라고 할 수 있는데 여기서 말하는 타부란 해의 순환이 일어남을 방지하는 일종의 기억장치라 할 수 있다. 타부기간은 전체 메모리의 크기를 의미하고 타부목록은 타부기간에 들어 있는 타부속성이 기록된 리스트이다. 여기서 타부속성은 해의 탐색동안 금지되어야 할 내용을 의미한다.

본 연구는 이러한 특징을 가지고 있는 타부서치를 이용하여 교점교환 알고리즘(node-exchange algorithm)을 제어하면서 최적해를 산출하였다. 본 연구에서 사용된 교점교환 알고리즘은 교점을 서로 교환함으로써 여러 개의 호를 교환하는 효과가 있으면서 각 경로 내에서 2개의 수요지점씩 교환을 실시함으로써 적은 계산량으로 문제를 해결할 수 있다[16].

3.3 하이브리드 ACS 알고리즘

본 연구에 적용된 하이브리드 ACS 알고리즘은 다음과 같다. 여기에서 Step 1~5는 초기해 산출을 위한 ACS 알고리즘, Step 6~8은 최적해 산출을 위한 타부서치와 ACS 알고리즘이다.

Step 1 : 알고리즘 수행을 위한 파라미터 설정

Step 2 : 개미들의 초기경로 구성

Step 3 : 개선경로 구성(파라미터 변경 방법)

- ① 개미들이 구성한 초기경로의 값을 X_{old} 라 하고 새로 산출된 경로의 값을 X_{new} 라 한다. 이 때, X_{old} 가 일정 횟수동안 $X_{old} < X_{new}$ 이면, 국부최적에 빠졌다고 평가하고 파라미터 (α, β)

를 변경하여 노드를 선택한다.

- ② $X_{old} \geq X_{new}$ 가 되었을 경우, 다시 (α, β) 를 기본 파라미터 값으로 바꾼다.

Step 4 : 페로몬 지역갱신

Step 5 : 초기해 산출

Step 6 : 타부서치를 이용한 교점교환으로 해개선

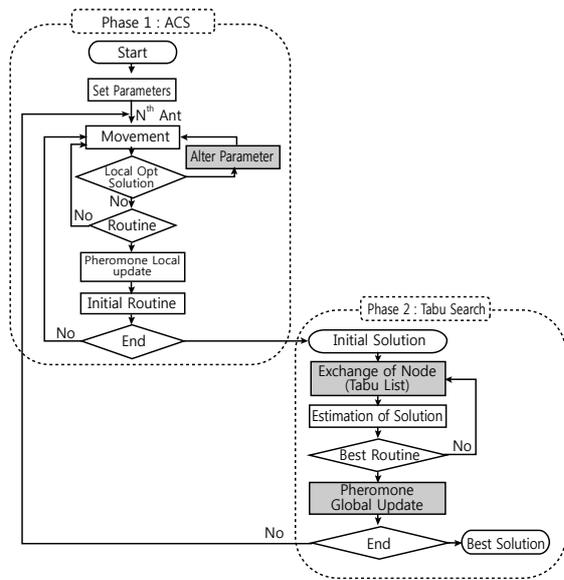
- ① 산출된 각각 경로를 더한 총 운행거리(비용) 값을 $Z_{old}(C_{old})$ 라 하고 교점교환을 실시한 후 산출된 새로운 총 운행거리(비용) 값을 $Z_{new}(C_{new})$ 라고 한다. 교점교환은 각 차량경로 내에서 실시하며 첫 번째 차량에 대한 교환이 완료 되면 다음 차량경로에서 수요지점을 교환한다.
- ② $Z_{old} \geq Z_{new}(C_{old} \geq C_{new})$ 이면, 새로운 목적함수 값과 경로를 기억장소에 저장하여 해를 개선시키고 $Z_{old} < Z_{new}(C_{old} < C_{new})$ 이면, 사용했던 교점의 교환목록을 타부목록에 기록하며 기존해는 계속 유지한다.

Step 7 : 해평가 후 최적경로시 페로몬 전역갱신

- ① 산출된 경로의 값을 Y_{old} 라 하고 교점교환을 통하여 새로 산출된 경로의 값을 Y_{new} 라 한다. 이 때, $Y_{old} \geq Y_{new}$ 이면, 최적경로가 구성되었다고 평가하고 페로몬 전역갱신을 수행한다.
- ② $Y_{old} < Y_{new}$ 일 경우에는 Step 6의 교점교환을 다시 실시한다.

Step 8 : 최적해 산출

위에서 설명한 하이브리드 ACS 알고리즘에서 Step 3과 7인 본 연구에 적용한 고유방법으로 Step 3을 통하여 탐색공간을 확장하였고 Step 7을 사용하여 페로몬 증발을 방지하고 강화를 유도하였다. ACS 알고리즘의 전반적인 절차를 순서도로 나타내면 <그림 3>과 같으며, 그림의 좌측은 ACS 알고리즘 절차이고 우측은 타부서치 절차를 나타낸다.



<그림 3> 하이브리드 ACS 알고리즘 절차도

기존 연구들과의 가장 큰 차이점은 기존의 연구들이 한 종류의 알고리즘을 이용하였으나, 본 연구에서는 전역 탐색능력이 우수한 초기해 산출단계와 지역탐색 능력이 우수한 최고해 산출단계로 구분하고 각각의 단계에 적합한 알고리즘을 조합하여 사용함으로써 지역 최적해에 빠지지 않고 전체 최적해를 찾을 수 있는 알고리즘을 구성하였다는 것이다. 또한 2단계 해법에서 초기경로 구성 후 교점교환하여 산출된 최적경로에 대하여 최적경로 여부를 판단하여 최적경로에 대해서만 페로몬을 강화하는 절차를 사용하였다는 것이다.

4. 수치실험 및 적용

제안된 알고리즘의 효율성을 입증하기 위하여 TSP 및 HVRP 각각의 실험예제 수치실험을 통하여 기존 알고리즘의 최적해와 비교한다.

제안된 하이브리드 ACS 알고리즘에 사용된 기본 환경변수는 $\rho = 0.3, \alpha = 1, \beta = 2, q_0 = 0.05, \Delta\tau(r, s) = (n \times L_{nn})^{-1}$ 로 설정하여 100회 반복 탐색하였고, 개미수는 노드수와 동일하게 적용한다. 또한, 타부서치에 사용되는 타부목록의 크기나 교점교환 횟수는 예제에 따라 적합하게 조정한다.

전역 최적경로의 길이가 더 이상 향상되지 못하면 파라미터 (α, β) 를 $\alpha = 0.4, \beta = 1.0$ 로 변경하여 다음 노드를 선택하고 새로운 최적경로를 탐색하게 되면 다시 기본 파라미터 값으로 바꾸어 탐색한다.

4.1 수치실험

4.1.1 외판원 문제(TSP)

먼저 TSP 문제에서의 알고리즘 효율성을 입증하기 위해 TSPLIB[18]에서 모델 집합들을 추출하여 제시된 최고해 및 기존연구와 비교실험을 수행한다.

본 연구에서 비교한 기존연구는 지역탐색을 통하여 우수한 해를 얻고자 한 ACS-3-opt 알고리즘[12]과 노드 선택을 인접한 노드에 대한 거리로만 결정하지 않고 길이가 w 인 부경로 정보를 이용해 다음

<표 2> 기존연구 vs 하이브리드 ACS 실험결과 비교

TSPLIB	Known Best	ACS -3-opt (A)	ACS -Sub (B)	Proposed		Improved Rate(%)	
				Best (C)	Aver -Best	(A : C)	(B : C)
eil51	426	426	426	426	427.8	0	0
a280	2579	2579	2579	2579.0	2586.1	0	0
att532	27686	27686	27686	27685.4	27704.2	0.0022	0.0022
rat783	8806	8806	8806	8806.0	8815.5	0	0
u1060	224094	224257	224238	224101.1	224321.1	0.0695	0.0611
vm1084	239297	239297	239349	239306.1	239431.8	-0.0038	0.0179
pcb1173	56892	56893	56901	56892.2	56976.6	0.0014	0.0155
ri1323	270199	270547	270755	270327.7	270564.3	0.0811	0.1578
u1432	152970	153284	153265	153089.2	153384.7	0.1271	0.1147

노드를 선택하는 ACS-Subpath 알고리즘[14]이다.

하이브리드 ACS 알고리즘을 이용한 비교실험 결과는 <표 2>와 같으며, eil51 등 3개의 예제에서 최적해가 최고해와 동일하게 산출되었고 기존 알고리즘과 비교결과 제안된 하이브리드 ACS 알고리즘이 최적경로 탐색의 대부분 문제에서 우수한 성능을 보여주는 것으로 나타난다.

4.1.2 차량경로문제(VRP)

다음은 TSP 문제에서 효율성이 입증된 알고리즘을 군사문제에 적용하기 위하여 기존 연구된 HVRP 데이터를 활용하여 수치실험 후, 기존연구와 결과를 비교하여 VRP 문제에서의 알고리즘 효율성을 입증한다.

본 연구에서는 변동비를 동일하게 적용하여 운행

<표 3> 노드별 위치 및 수요량 정보

Node	Position	Demand Volume	Point	Position	Demand Volume
1	(37, 52)	7	11	(42, 41)	19
2	(49, 49)	30	12	(31, 32)	29
3	(52, 64)	16	13	(5, 25)	23
4	(20, 26)	9	14	(12, 42)	21
5	(40, 30)	21	15	(36, 25)	10
6	(21, 47)	15	16	(52, 41)	15
7	(17, 63)	19	17	(27, 23)	3
8	(31, 62)	23	18	(17, 33)	41
9	(52, 33)	11	19	(13, 13)	9
10	(51, 21)	5	20	(57, 58)	28

<표 4> 변동비 및 고정비

Vehicle (Capacity)	A(20)	B(30)	C(40)	D(70)	E(120)
Fixed Cost	20	35	50	120	225
Floating Cost	1.0	1.3	1.9	2.4	2.9

<표 5> Taillard vs Im vs Hybrid ACS 실험결과 비교

Section	Vehicle	Route of Vehicle	Loadage	Traveling Distance	
Taillard	A	D → 7 → D	19	52.84	
	B	D → 8 → 1 → D	30	47.58	
	B	D → 12 → D	29	16.12	
	C	D → 5 → 11 → D	40	37.36	
	E	D → 18 → 4 → 19 → 13 → 14 → 6 → D	108	82.9	
	E	D → 3 → 20 → 2 → 16 → 9 → 10 → 15 → 17 → D	103	104.5	
	Fixed Cost	590	Traveling Distance	371.02	
	Floating Cos	836.29	Traveling Cost	1,426.29	
Im	A	D → 15 → 17 → D	13	53.4	
	B	D → 12 → D	29	16.2	
	C	D → 9 → 10 → 5 → D	37	63.7	
	D	D → 1 → 8 → 7 → 6 → D	64	67.5	
	E	D → 3 → 20 → 2 → 16 → 11 → D	108	82.9	
	E	D → 14 → 18 → 13 → 4 → 19 → D	103	104.5	
	Fixed Cost	675	Traveling Distance	388.03	
	Floating Cost	643.03	Traveling Cost	1,318.03	
This Study	A	D → 19 → 4 → D	18	39.1	
	A	D → 7 → D	19	52.84	
	B	D → 17 → 15 → 10 → 9 → D	29	95.4	
	C	D → 14 → 6 → D	36	51.2	
	D	D → 13 → 18 → D	64	47.5	
	D	D → 12 → 5 → 11 → D	69	52.3	
	E	D → 8 → 1 → 3 → 20 → 2 → 16 → D	119	100.5	
	Fixed Cost	590	Traveling Distance	440.84	
	Floating Cost	726.58	Traveling Cost	1,316.58	

거리와 고정비의 합을 최소화시킨 Taillard[17]의 예제와 변동비와 고정비의 합을 최소화시킨 문제인 임무군[7]의 예제를 선정하여 본 연구의 결과와 비교하였다. 이 때, Taillard의 예제는 차량종류별 운행거리에 고정비만(고정비+운행거리) 고려하여 나온 결과값으로 본 연구와 비교하기 위하여 위 연구에 변동비를 적용(고정비+운행거리×변동비)하였다. 실험 예제에 적용된 수요지 및 변동비, 고정비 정보는 각각 <표 3>, <표 4>와 같으며, 차량 보유대수는 종류별 2대씩 총 10대로 모든 수요지의 수요량보다 충분히 많은 차량을 보유하고 있는 것으로 가정한다.

비교 예제와 본 연구의 실험결과는 <표 5>와 같다. 기존연구와 비교결과, Taillard와 임무군 예제의 운행비용보다 우수한 결과값이 산출되어 하이브리드 ACS 알고리즘이 HVRP 문제에서도 효율적임을 확인하였다.

4.2 군사문제 적용

4.2.1 실험설계

작업지점은 depot을 포함하여 총 22개 지점으로 <그림 2>와 <표 1>의 자료를 사용하였으며, 중형 제설차만 작업 가능한 지점을 별도로 구분하여 표시하였다.

제설차의 제원은 실제 제설차의 제원을 적용하였고 차량의 1회 작업 가능시간은 엔진 냉각을 고려한 최대 엔진 가동시간을, 작업 제한시간은 제설 작업 소요시간 중 완전작전 가능 III급 상태인 1시

간 50분을 적용하였다. 차량제원을 바탕으로 제설 작업과 관련된 세부자료는 <표 6>과 같다.

4.2.2 수리모형 검증

먼저 제시한 수리모형을 검증하기 위해 <표 1>의 작업지점별 세부 데이터를 축소한 작업지점 6개, 차량 2대, depot(2,000, 500)를 기준으로 산출하였으며, ILOG CPLEX 11.1에 사용한 데이터를 하이브리드 ACS 알고리즘에 적용하여 최적값 확인을 통해 본 수리모형의 타당성을 검증하였다.

실험 결과값은 <표 7>과 같으며 실험결과 각 알고리즘이 동일한 결과값을 보임으로써 수리모형의 타당성을 검증하였다. 추가적으로 작업지점을 12~15개까지, 차량은 2~3대로 설정하고 실험하였으며, 작업지점이 15개 이상부터는 컴퓨터 연산 능력 초과로 인해 최적해를 산출하지 못하고 연산이 종료되었다. 이를 통해 실제 적용가능한 대규모 문제의 해법을 위해서는 메타 휴리스틱 알고리즘이 필요함을 확인할 수 있다.

<표 7> 수리모형 유효성 검증

Section	ILOG CPLEX		Hybrid ACS	
	Cost (won)	Calculated Time(sec)	Cost (won)	Calculated Time(sec)
Node 6, Vehicle 2	1,063,506	3.746	1,063,506	0.125
Node 9, Vehicle 2	1,822,909	5.143	1,822,909	0.266
Node 12, Vehicle 2	2,246,795	9.542	2,246,795	0.516
Node 15, Vehicle 3	-	-	2,754,419	1.359

<표 6> 제설차량 일반정보

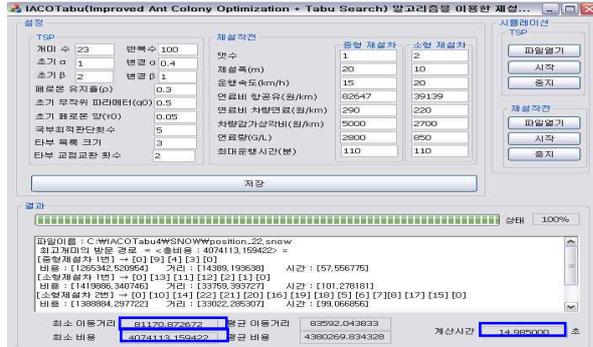
(단위 : 원)

Section		Medium	Small
Width of Snow Removal(m)		20	10
Moving Speed(km/h)		15	20
Oil Cost (per km)	Aviation Oil	82,647	39,139
	Vehicle Oil	290	220
Depreciation Expense of Vehicle(per km)		5,000	2,700

4.2.3 실험결과

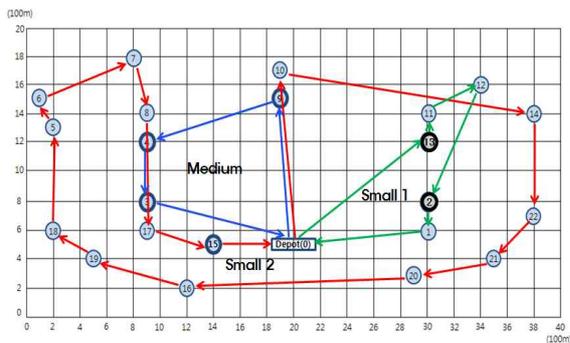
실제문제에서는 하이브리드 ACS를 사용하여 작업지점 22개, 중형 제설차 1대, 소형 제설차 2대를 기준으로 100회 반복실험을 수행하였으며, 실험결과는 <그림 4>와 같이 최소비용은 4,074,113.16원(중형 : 1,265,342.52원, 소형 : 2,808,770.64원), 최소 이동거리는 81.17km(중형 : 14.39km, 소형 : 66.78km)

로 계산되었고 비용과 이동거리의 100회 평균은 4,380,269.83원, 83.59km, 총 계산시간은 14.985초였다.



<그림 4> 하이브리드 ACS 실험결과

실험결과를 제설차의 이동경로로 나타내면 <그림 5>와 같다. 먼저 중형 제설차는 0→9→4→3→0의 경로로, 소형 제설차는 각각 0→13→11→12→2→1→0, 0→10→14→22→21→20→16→19→18→5→6→7→8→17→15→0의 경로로 이동한다.



<그림 5> 제설차량 이동경로

소형 제설차 1의 경우 중형 제설차가 작업가능한 2, 13지점의 작업을 대신하였고, 중형 제설차는 최소한의 작업수행으로 총 비용을 절감하였다. 소형 제설차 2의 경우 나머지 지점을 순환하며 작업을 수행하여 총 이동거리는 증가하였으나, 비용측면에서는 운행비용이 적은 소형 제설차의 운행과 소형 제설차 1대가 면적이 작은 외곽지역 위주의 작업을 수행하여 기존 경험을 바탕으로 한 운행방

식의 비용과 비교하였을시 32.3% 비용을 절감할 수 있었다. 기존 운행방식의 비용산정은 본 연구의 알고리즘을 최적경로가 아닌 랜덤으로 경로를 선택할 수 있게 설정하여 산출값을 비교하였다.

5. 결론 및 향후 연구방안

본 연구에서는 공군의 제한된 가용자원과 시간 내에서 최소의 비용으로 효율적인 비행단 제설작전을 수행하기 위하여 총 비용을 고려한 HVRP의 변형 문제를 제시하고 이 문제를 효과적으로 해결할 수 있는 개선된 ACS 알고리즘을 활용한 2단계 해법을 제안하였다.

1단계에서는 다양한 탐색을 거쳐 우수한 해를 구성하는 파라미터 변경 기법 기반의 ACS를 적용하였고, 2단계에서는 구해진 초기해로부터 사이클링을 방지하고 지역 최적해에서 탈출할 수 있는 개선형 메타휴리스틱인 타부서치를 적용하였다. 그 결과 기존의 최적해 연구결과보다 최대 0.16% 우수한 해를 탐색하였고 기존의 주요 해법보다 우수한 결과를 나타냄으로써 각 단계에서 탐색특성에 맞추어 적용된 해법들이 효과적인 것으로 입증되었다.

또한 초기해 구성시 개미의 고유특성인 페로몬의 파라미터 변경 기법을 적용한 ACS 알고리즘을 제안하여 우수한 초기해의 탐색이 최고해의 질을 높일 수 있음을 증명하였고, 타부서치를 이용한 하이브리드 메타 휴리스틱 기법을 활용하여 기존의 유사 연구보다 우수한 최적해를 탐색하였다.

결과적으로 제안된 하이브리드 ACS 알고리즘을 공군 제설작전에 적용하여 작업 요구시간 내에 최소의 비용으로 제설작업을 수행하여 항공작전 지원뿐만 아니라 불필요한 제설차 운행을 방지하여 군 운영예산 절감에도 기여할 것으로 판단된다.

향후 연구과제로는 군사문제에서 간소화하였던 제약식을 우선순위 부여 등 실제상황에 맞게 수정하는 추가 연구나 본 연구에서 다루지 않았던 결과값에 영향을 줄 수 있는 최적의 파라미터(α, β)를 설정하는 방법, 노드 수에 따른 최적의 개미 수 등

의 추가 연구가 필요하다. 또한 방대한 해공간을 갖는 문제를 효율적으로 해결할 수 있는 타부서치 외에 다른 지역 최적화 기법을 이용한 개선 알고리즘 개발 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] 김여근, 윤복식, 이상복, 「메타휴리스틱」, 영지문화사, 2000.
- [2] 심규석, 이희상, 김운배, 박진수, 김재범. “탐색개미-일개미 군집화 알고리즘”, 「대한산업공학회/한국경영과학회 2006년도 춘계공동학술대회 논문집」, 2006.
- [3] 윤태용, 이상헌, “주기적 다용량 차량경로문제에 관한 발견적 해법”, 「한국경영과학회지」, 제26권, 제1호(2011), pp.27-3.
- [4] 이상헌, “타부서치를 이용한 2차원 직사각 적재문제에 관한 연구”, 「대한산업공학회/한국경영과학회 2004년도 춘계공동학술대회 논문집」, 2004.
- [5] 이상헌, 김문규, “Hatch를 고려한 컨테이너 터미널 적재순서 최적화 연구”, 「대한산업공학회지」, 제19권, 제4호(2006), pp.270-280.
- [6] 이상헌, 이정민, “타부서치를 이용한 2차원 직사각 적재문제에 관한 연구”, 「경영과학」, 제22권, 제1호(2005), pp.167-178.
- [7] 임무균, 전건욱, “유전자 알고리즘을 이용한 운행비용 최소화 다용량 차량경로문제”, 「대한산업공학회지」, 제20권, 제2호(2007), pp.103-111.
- [8] 최정록, 김각규, 이상헌, “개미군집시스템을 이용한 군 비행단 제설작전 운영”, 「한국경영과학회 2012년도 추계학술대회논문집」, 2012.
- [9] Dantzig, G.B. and J.H. Ramser, “The Truck Dispatching Problem,” *Management Science*, Vol.6(1959), pp.80-91.
- [10] Dorigo, M. and G. Di Caro, *The Ant Colony Optimization Meta-heuristic*, New Ideas in Optimization, McGraw-Hill, New York, 1999.
- [11] Dorigo, M., V. Maniezzo, and A. Colomi, “Ant System : An Autocatalytic Optimizing Process,” *Technical Report*, (1991), pp.91-016.
- [12] Gambardella, L.M. and Dorigo, “Ant Colony System : A Cooperative Learning approach to the Traveling Salesman Problem,” *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol.1, No.1(1997), pp.53-66.
- [13] Glover, F., “Heuristic for Integer Programming Using Surrogate Constraints,” *Decision Sciences*, Vol.8(1977), pp.1153-1173.
- [14] Kim, I.K. and M.Y. Youn, “Improved Ant Colony System for the Traveling Salesman Problem,” *The KIPS transactions. Part B*, Vol.12, No.7(2005), pp.823-828.
- [15] Li, F., B. Golden, and E. Wasil, “A record-to-record travel algorithm for solving the heterogeneous fleet vehicle routing problem,” *Computers and Operations Research*, Vol.34(2007), pp.2734-2742.
- [16] Narry, W.P. and J.W. Varnes, “Solving the pickup and delivery problem with time window using reactive tabu search,” *Transportation Research Part B : Methodological*, Vol.34(2000), pp.107-121.
- [17] Taillard, E.D., “A heuristic column generation method for the heterogeneous fleet VRP,” *Operations Research*, Vol.33(1999), pp.1-14.
- [18] <http://elib.zib.de/pub/Packages/mp-testdata/tsplib/tsplib.html>.