

시간제약하 배달과 수거를 동시에 수행하는 차량경로문제를 위한 개미군집시스템

이상현[†] · 김용대

국방대학교 운영분석학과

Ant Colony System for Vehicle Routing Problem with Simultaneous Delivery and Pick-up under Time Windows

Sang-Heon Lee · Yong-Dae Kim

Department of Operations Research, Korea National Defense University, Seoul, 122-875

This paper studies a vehicle routing problem variant which considers customers to require simultaneous delivery and pick-up under time windows(VRPSDP-TW). The objective of this paper is to minimize the total travel distance of routes that satisfy both the delivery and pick-up demand. We propose a heuristic algorithm for solving the VRPSDP-TW, based on the ant colony system(ACS). In route construction, an insertion algorithm based ACS is applied and the interim solution is improved by local search. Through iterative processes, the heuristic algorithm drives the best solution. Experiments are implemented to evaluate a performance of the algorithm on some test instances from literature.

Keywords: VRPSDP-TW, Ant Colony System, Insertion Algorithm, Local Search

1. 서론

오늘날 기업에서는 환경에 대한 의식 변화와 제한된 자원과 에너지의 낭비를 줄이기 위해 기존의 배송 물류시스템(forward logistics)에 재활용 또는 재생 가능한 제품 및 포장재들을 역방향으로 수송하는 역물류시스템(reverse logistics)을 통합한 환경친화적 물류시스템을 구축하고 있다. 역물류시스템(reverse logistics)이란 수명이 다하거나 소비자가 폐기한 제품의 수거(collection)에서부터 분해(disassembly), 분류와 검사(sorting and test), 재사용(reuse), 재제조(remanufacturing), 재활용(recycling) 및 폐기(disposal) 등의 처리활동들을 포괄한 개념으로 20세기 말부터 그 개념이 정립되기 시작하였고 현재 많은 연구들이 진행되고 있다(Lee *et al.*, 2008). 이러한 변화된 물류시스템 환경 하에서 기업은 효율적인 차량운영과 물류비용을 줄이기 위해 기존의 배송프로세스에 역방향의 수송프로세스를 동시에 고려한 최적의 차량운행경로계획을 수립하여 운영하는 것이

매우 중요하다. 최적의 차량운행경로계획이란 전체 차량의 운행거리를 최소화하고 운행 차량의 수를 줄이며, 차량의 적재 용량을 최대한 활용하여 고객이 원하는 서비스 시간대에 고객의 수요를 만족시키는 것이다. 따라서 각 차량은 동일한 수요 지점을 중복 방문하지 않으며, 가능한 한 하나의 차량이 많은 수요지점을 방문하도록 차량경로를 구성하여야 한다. 그러나 지금까지 대부분의 차량경로 문제(Vehicle Routing Problem, VRP)에 대한 연구는 배달 또는 수거 중 한 가지 형태의 작업을 수행하는 물류시스템을 대상으로 이루어져 왔으며, 배달과 수거를 동시에 고려한 차량경로문제에 관한 연구는 상대적으로 미비한 실정이다.

차량의 한 순회(tour)동안 배달과 수거가 통합되어 운영되고 있는 사례들은 주변에서 많이 찾아볼 수 있다. 주류 또는 음료 회사에서 주문배달과 빈 용기 및 박스 수거, 가전업체에서 신제품 배달과 폐가전제품 수거, 택배회사에서 소하물 배달과 수거, 인터넷 쇼핑물에서 상품 배송과 반품 수거 등을 들 수 있

[†] 연락저자 : 이상현 교수, 122-875 서울시 은평구 수색동 205번지 국방대학교 운영분석학과, Tel : 02-300-2374, Fax : 02-309-6233,

E-mail : leesangh@kndu.ac.kr

2008년 □월 □일 접수; 2008년 □월 □일 수정본 접수; 2008년 □월 □일 게재 확정.

다(Chung and Park, 2004).

차량경로문제에 대한 전통적인 모형은 Danzig and Ramser (1959)가 최초로 제안했으며, 전통적인 차량경로문제에서 확장된 배달과 수거 고객이 존재하는 차량경로문제는 다음 세 가지 유형으로 구분할 수 있다. 첫 번째는 배달과 수거고객이 분리되어 있고 배달고객에 대한 서비스를 마친 이후 수거 고객에 대한 서비스를 실시하는 귀로 수거화물이 있는 차량경로문제(VRP with Backhauls, VRPB), 두 번째는 VRPB에서 설정하고 있는 모든 배달작업을 반드시 수거작업에 우선하여 수행해야 한다는 가정을 완화한 배달과 수거가 혼합된 차량경로문제(VRP with Mixed Delivery and Pick-up, VRPMDP)이다. 세 번째는 한 수요지점에서 배달과 수거가 모두 발생하며 배달과 수거를 동시에 수행하는 차량경로문제(VRP with Simultaneous Delivery and Pick-up, VRPSDP)로 구분할 수 있다. 특히 VRPMDP는 각 고객의 배달물량과 수거물량이 0이 되는 경우인 VRPSDP의 특이한 사례로 고려될 수 있다(Pisinger and Ropke, 2007).

본 연구에서는 기존의 연구에서 이루어졌던 배달과 수거를 분리해서 수행하는 것에서 나아가 한 수요지에서 두 작업을 동시에 수행하고 시간제약(time windows)을 추가한 차량경로문제를 다룬다. 이런 유형의 차량경로문제를 시간제약하 배달과 수거를 동시에 수행하는 차량경로문제(VRP with Simultaneous Delivery and Pick-up under Time Windows, VRPSDP-TW)라고 명명한다.

VRPSDP는 문제의 복잡성(complexity)으로 인하여 VRPB에 비해 상대적으로 기존 연구문헌이 적으며, 본 연구에서 처음으로 고려된 VRPSDP-TW는 VRPSDP에 시간제약을 추가하여 확장한 문제로써 VRPSDP보다 해결하기 어려운 NP-hard 문제이다.

VRPSDP에 관한 연구는 Min(1989)에 의하여 최초로 이루어졌다. Min은 미국 오하이오주 한 시립도서관에서 매일 주변의 22개 지역도서관에 도서자료를 배달, 수거하는 사례문제에 대해 차량경로를 결정하는 3단계 순차적 절차를 제시하였다. 첫 번째 단계에서는 전체 고객들을 소집단으로 분류하고, 두 번째 단계에서는 차량과 운전자를 각 소집단에 할당하며, 마지막 단계에서는 TSP기법을 적용하여 차량경로를 결정하였다. Dethloff(2001)는 VRPB와 VRPSDP의 관계를 규명하고 VRPSDP를 풀기 위한 방법으로 삽입기법의 cluster-first and route-second 휴리스틱 기법을 제안하였다. 고객들을 삽입하기 위해 여러 가지 기준을 사용하였는데, 고객을 삽입할 때 추가이동거리(travel distance)를 삽입기준의 척도로 사용하고, 차량의 잔여용량(residual capacity)을 토대로 하는 기준을 사용하였다. 또한 차고지(depot)로부터 멀리 떨어진 고객들의 불합리한 삽입을 피하기 위한 보상거리(radial surcharge)와 모든 삽입기준의 통합기준(combination)을 사용하였다. Chung(2004)은 시간제약이 있는 VRPMDP에 유전자 알고리즘을 적용하였고, 수거 고객에 대해서는 중복방문을 허용하였다. 초기해는 saving기법으로 생성하고, 교차와 돌연변이는 새로 제안하는 RMX와 TMX연

산자 및 병합변이, 분리변이 등을 사용하였고 2-opt와 Or-opt 기법을 사용하여 해를 개선하였으나 해의 계산시간에서는 개선을 이루지 못하였다. Crispim and Brandao(2005)는 tabu search와 neighborhood search를 혼합한 알고리즘을 제안하였으며, 초기해는 sweep 알고리즘을 이용하여 구성하고, 해 개선단계에서는 insert와 swap기법을 적용하였다. Tang and Galvao(2006)는 tour partitioning과 sweeping 휴리스틱 방법으로 초기해를 구성하고, relocation, interchange, crossover, 2-opt 기법을 사용하여 초기해를 개선하여 우수한 해를 도출하였다. Bianchessi and Righini(2007)는 첫 단계에서 tour partitioning 휴리스틱으로 초기해를 만들고, 두 번째 단계에서는 타부 서치를 기반으로 arc-exchange와 node-exchange를 이용하여 이웃해를 형성하고 개선하는 휴리스틱을 제안하였다. Zhang *et al.* (2007)은 여유 적재용량(residual capacity)을 휴리스틱 정보로 이용한 ACS(Ant Colony System)알고리즘을 적용하였고, 페로몬 업데이트는 ASRank와 MMAS 전략을 사용하여 해를 도출하였다.

이상의 기존 연구들을 분석한 결과, 휴리스틱 단독으로는 우수한 해를 도출할 수가 없고, 다른 휴리스틱이나 메타 휴리스틱을 함께 사용할 때 우수한 해를 도출하였다. 또한 최근의 메타 휴리스틱의 발전방향을 보면 초기해 구성시 Saving, Insertion, Nearest Neighbor 등의 구성형 해법을 이용하고, 지역탐색기법인 2-opt나 Or-opt 등의 개선형 해법을 결합한 메타 휴리스틱이 주를 이루고 있음을 알 수가 있다.

메타 휴리스틱 기법 중의 하나인 개미군집시스템(ACS) 알고리즘은 까다로운 제약조건을 반영하기 쉽고, multi-start의 개념을 가지고 우수한 해들의 특성을 종합적으로 반영하기 때문에 NP-hard문제의 다양한 해 공간 탐색에 있어서 큰 장점을 가지고 있다. 그러나 기본적으로 구성형 해법이기에 때문에 집중적인 해 탐색에 대해서는 약점을 가지고 있다.

따라서 본 연구에서는 총 차량운행거리 최소화를 목적으로 구성형 해법인 삽입 기법을 기반으로 한 개미군집시스템(ACS)을 적용하여 초기해를 생성하고, 지역탐색 기법중의 하나인 swap 알고리즘을 적용하여 초기해를 개선시키는 IB-ACS(Insertion based ACS; IB-ACS) 알고리즘을 제안하고자 한다.

본 논문의 구성은 제 2장에서 모형을 정의하고 수리모형을 제시하며 제 3장에서 VRPSDP-TW을 위한 삽입기법 기반의 ACS 알고리즘을 제안한다. 제 4장에서는 제안한 알고리즘을 예제에 적용하여 그 결과를 확인하고 기존문헌의 제반 연구결과와 비교하여 IB-ACS 알고리즘의 효율성을 입증하며, 제 5장에서 결론과 향후 연구 과제를 제시한다.

2. VRPSDP-TW 수리모형

2.1 모형 정의 및 가정 사항

본 연구에서 다루고자 하는 차량경로문제의 모형은 전체 네

트위크상에 N 개의 수요지점이 있고, 이 수요지점들의 수요량을 충족시킬 수 있는 유일한 공급지인 단일창고(single depot)는 차량 적재용량(Q)이 동일하고 보유대수는 제한 없이 가용 차량을 보유하고 있다. 그리고 각 수요지점은 배달과 수거 작업을 동시에 요구하며 서비스 물량은 사전에 알려져 있고, 각 수요지점마다 반드시 지켜야 하는 서비스 시간대(hard time windows)와 처리 물량에 비례하는 서비스 시간(service time)이 존재한다. 또한 각 차량은 고객의 수요량을 만족시키고 창고(depot)로 복귀해야 하는 시간이 존재한다. 이러한 VRPSDP-TW 모형을 구성하는데 필요한 가정 사항은 다음과 같다.

- 가. 모든 차량은 단일 창고(single depot)를 출발하여 다시 창고로 돌아온다.
- 나. 고객의 수요량(배달과 수거)은 한 대의 차량에 의해서 1회 방문으로 충족시킨다.
- 다. 각 차량의 경로에 포함된 고객의 배달량은 차량 출발시 모두 적재된다.
- 라. 각 차량의 경로에 포함된 고객의 수거량은 모두 창고로 회수된다.
- 마. 보유차량대수는 무한하며, 차량의 적재용량은 모두 동일하다(homogeneous).
- 사. 각 차량경로에서 고객의 총 배달량과 수거량은 차량 용량을 초과할 수 없다.
- 아. 고객간 이동시간은 고객간 거리와 동일하다.

2.2 수리모형

본 장에서는 모형 정의와 가정 사항을 수리모형으로 구성하기 위해 필요한 변수들을 정의하고 모형을 수립하며 제약식들에 대해 설명한다.

수리모형에 사용되는 변수들은 다음과 같다.

<Notation>

- N : depot를 포함한 고객 집합(0 : depot)
- C : 고객 집합
- Q : 차량 용량
- V : 차량 집합
- T : 차량 운행시간의 한계
- c_{ij} : 간선(i, j)의 거리
- e_i : 고객 i 의 서비스 가능 하한 시간(earliest time)
- l_i : 고객 i 의 서비스 가능 상한 시간(latest time)
- t_{ij} : 간선(i, j)의 운행시간
- s_i : 고객 i 의 서비스 시간
- p_i : 고객 i 의 수거물량
- d_i : 고객 i 의 배달물량
- M : Big M

< Decision variable >

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{차량 } k \text{가 고객 } i \text{에서 } j \text{로 이동하면} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

- L_k : Depot 출발시 차량 k 의 적재물량
- q_{ik} : 고객 i 방문 후 차량 k 의 적재물량
- a_{0k} : 차량 k 의 depot에 도착하는 시간
- a_i : 고객 i 지점 도착시간
- w_i : 고객 i 지점의 대기시간

위에서 정의한 변수로 VRPSDP-TW 수리모형을 구성하면 다음과 같다.

$$\min \sum_{k \in V} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} c_{ij} x_{ijk} \quad (1)$$

subject to

$$\sum_{k \in V} \sum_{i \in N} x_{ijk} = 1 \quad \forall j \in C \quad (2)$$

$$\sum_{i \in N} x_{ihk} - \sum_{j \in N} x_{hjk} = 0 \quad \forall h \in C, \forall k \in V \quad (3)$$

$$\sum_{j \in N} x_{0jk} \leq 1 \quad \forall k \in V \quad (4)$$

$$\sum_{k \in V} x_{iik} = 0 \quad \forall i \in C \quad (5)$$

$$L_k = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} x_{ijk} d_j \quad \forall k \in V \quad (6)$$

$$L_k - d_j + p_j - M(1 - x_{0jk}) \leq q_{jk} \quad \forall j \in N, \forall k \in V \quad (7)$$

$$q_{ik} - d_j + p_j - M(1 - x_{ijk}) \leq q_{jk} \quad \forall i, j \in N, i \neq j, \forall k \in V \quad (8)$$

$$L_k \leq Q \quad \forall k \in V \quad (9)$$

$$q_{ik} \leq Q \quad \forall i \in N, \forall k \in V \quad (10)$$

$$a_j - a_i \geq s_i + w_i + t_{ij} + M \left(\sum_{k \in V} x_{ijk} - 1 \right) \quad \forall i, j \in C, i \neq j, \forall k \in V \quad (11)$$

$$T \geq a_{0k} \geq a_i + s_i + w_i + t_{i0} + M(x_{i0k} - 1) \quad \forall i \in C, \forall k \in V \quad (12)$$

$$e_i \leq a_i + w_i \leq l_i \quad \forall i \in C \quad (13)$$

위 수리모형의 목적식 (1)은 총 운행거리를 최소화하는 것이며, 제약식 (2)는 각각의 고객은 정확히 차량 한 대에 의해 서비

스 받는 것을 의미한다. 제약식 (3)은 각 차량은 연속된 경로로 운행하는 제약을 의미하고, 제약식 (4)는 모든 차량은 depot에서 한번만 출발가능하다는 것을 의미한다. 제약식 (5)는 차량이 동일지점에서 이동이 불가능하다는 의미이고, 제약식 (6)은 depot 출발시 각 차량의 적재물량을 의미한다. 제약식 (7)은 차량 k 가 첫 고객 방문 후 차량의 적재물량을, 제약식 (8)은 운행 중 차량의 적재물량의 변화를 계산한다. 제약식 (9)와 (10)은 차량 k 가 depot를 출발할 때와 각 고객 방문시 차량 적재량은 차량 최대적재량을 초과해서는 안된다는 의미이며, 제약식 (11)은 고객 j 에 도착시간은 이전 고객 i 에 도착시간, 대기시간, 서비스시간, 이동시간의 합보다 커야 된다는 의미이다. 제약식 (12)는 모든 차량의 depot로 돌아오는 시간은 차량의 운행제한시간보다 작고 바로 이전 지점에서의 도착시간, 대기시간, 서비스시간, 이동시간의 합보다 커야 된다는 의미이며, 제약식 (13)은 각 지점의 도착시간과 대기시간의 합은 서비스 가능한 시간보다 크고 상한 시간보다는 작다는 제약이다.

3. VRPSDP-TW를 위한 개미군집시스템 알고리즘

3.1 개미군집시스템(ACS) 개요

개미군집시스템(Ant Colony System, ACS)은 조합 최적화 문제를 해결하기 위해 Dorigo와 Di Caro(1999)에 의해 소개되었으며, 실제 개미들이 먹이에서 집까지 가장 짧은 경로를 찾는 능력을 모방한 메타 휴리스틱 기법이다.

실제로 개미들은 먹이를 찾아 이동시 페로몬(pheromone)이라는 화학 물질을 이용하여 서로간의 정보를 교환한다. 축적된 페로몬 정보에 의해 개미집으로부터 먹이까지 최단경로로 이동하는 능력을 가지게 된다. 이동하는 동안 개미는 자신이 이동한 경로 위에 페로몬을 분비하고, 또한 앞서 지나간 개미로부터 분비된 페로몬 흔적(trail)에 의해 다음 이동경로를 선택한다.

이러한 개미들의 행동습성으로부터 발견된 개미군집시스템은 NP-hard 문제를 풀기 위해 인공개미(artificial ant)라는 에이전트(agent)를 이용하여 모델을 구축한다. 인공개미는 실제 개미처럼 페로몬을 사용하여 서로 교신하고, 이동 경로 위에 축적된 페로몬 정보에 의해 확률적 방법으로 최단경로를 찾는다. 일반적으로 ACS는 다음과 같은 방법으로 수행을 한다. 먼저 m 개의 에이전트들이 초기화 규칙(initialization rule)에 따라 무작위로 n 개의 노드(node)를 선택한 다음, 각 에이전트들은 상태전이 규칙(state transition rule)에 따라 다음에 방문할 노드를 선택하고 계속해서 탐색과정을 거친다. 이러한 탐색과정을 거치는 동안 에이전트들은 지역 갱신 규칙(local updating rule)에 따라 방문한 각 간선에 페로몬 양을 변경하게 된다. 그리고 일단 모든 에이전트들이 탐색과정을 마치게 되면 전역 갱신 규칙(global updating rule)에 따라 다시 한번 페로몬 양을 변경

하게 된다. 결국, 각 에이전트들은 짧은 간선을 선택하려는 휴리스틱 정보와 많은 양의 페로몬을 가진 간선을 선택하려는 페로몬 정보에 따라 탐색경로를 완성하게 된다.

3.2 초기해 구성

인공개미의 숫자는 depot를 제외한 고객 수와 동일하고, 각각의 개미들은 초기화 규칙(initialization rule)에 따라 모든 고객 지점에 한 마리씩 위치하게 된다. 이에 따라 인공개미들은 depot에서 자신이 위치한 고객지점, 그리고 depot로 이어지는 초기 경로를 구축한다. 초기 경로를 구축한 후 차량의 적재용량과 고객의 서비스 시간제약 사항을 고려하여 현재 경로상에 삽입 가능한 고객들을 대상으로 삽입 기준값을 계산한다. 이때 휴리스틱 정보와 페로몬 정보를 이용하여 계산한 삽입 기준값이 가장 큰 고객을 현재 경로상의 최적 위치에 삽입한다. 기존 ACS에서는 휴리스틱 정보를 일반적으로 고객간 거리의 역수($\eta_{ij} = 1/d_{ij}$)를 사용하는 반면, 본 연구에서의 휴리스틱 정보는 식 (14)의 $\Psi(i, k, j)$ 로 표현한다.

$$\Psi(i, k, j) = \lambda d_{0k} - \gamma(d_{ik} + d_{kj} - d_{ij}) - (1 - \gamma)(b_j^{new} - b_j) \quad (14)$$

여기서, λ 와 γ 는 0과 1사이의 가중치로서, λ 는 depot로부터 멀리 떨어진 고객들의 불합리한 삽입을 피하기 위한 가중치이며, γ 는 고객을 해당경로에 삽입 후 증가된 이동거리와 서비스 시작 지연시간과의 상대적인 중요도를 나타내는 가중치이다. d_{0k} 는 depot에서 고객 k 까지의 거리, d_{ij} 는 고객 i 와 j 간 거리이다. b_j 는 고객 k 가 현재 경로상의 간선(i, j)에 삽입 전 고객 j 의 서비스 시작시간, b_j^{new} 는 삽입 후 고객 j 의 서비스 시작시간을 나타낸다.

본 연구에서 이용하는 페로몬 정보 $T(i, k, j)$ 는 고객 k 가 현재 경로상의 간선(i, j) 사이에 삽입 후 생성되는 간선(i, k)와 간선(k, j)의 페로몬 양의 평균값과 삽입 전 간선(i, j)의 페로몬 양과의 비율로 표현되며 수식은 식 (15)와 같다.

$$T(i, k, j) = \frac{\tau_{ik} + \tau_{kj}}{2\tau_{ij}} \quad (15)$$

앞서 정의한 휴리스틱 정보와 페로몬 정보를 이용하여 경로상에 삽입 가능한 고객들의 삽입 기준값(η_k)은 식 (16)과 같다.

$$\eta_k = \max_{(i, j) \in R_{cur}} \{T^\alpha(i, k, j) \times \Psi^\beta(i, k, j)\} \quad (16)$$

여기서, R_{cur} 은 현재 경로를 나타내고, α , β 는 페로몬과 휴리스틱 정보의 상대적인 중요도를 결정하는 파라미터이다. 그리고 각각의 고객(k)들은 현재 경로상에 삽입 가능한 위치가

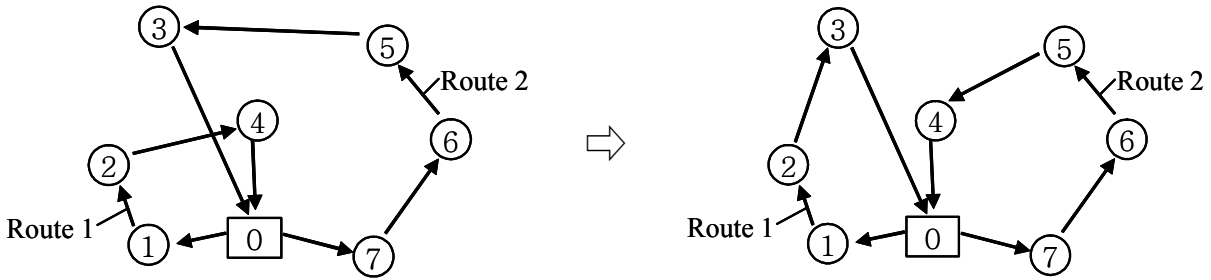


Figure 1. An example of performing swap algorithm

하나 이상일 경우 η_k 값이 여러 개 존재하는데, η_k 값 중 가장 큰 값이 고객 k 의 삽입 기준값이 되며, 그 위치가 현재 경로상에 삽입하기 좋은 최적의 위치가 된다. 그러나 삽입 가능한 위치가 한 곳도 없을 경우는 고객 k 의 η_k 값은 0이 된다.

삽입 가능한 고객들의 η_k 값이 모두 계산되면, 다음 고객 선택 시 η_k 값이 가장 큰 고객을 무조건 선택하는 게 아니라, 0과 1 사이의 난수(q)를 발생시켜 사전에 정한 난수값(q_0)보다 작을 경우에는 η_k 값이 가장 큰 고객이 현재 경로상에 삽입되고, 클 경우에는 다음과 같이 확률 값을 계산하여 룰렛 휠(roulette wheel) 방식으로 고객들을 선택하게 되는데 확률계산식은 식 (17)과 같다.

$$p_k = \frac{\eta_k}{\sum_{l \in \Omega} \eta_l} \quad (17)$$

여기서, p_k 는 고객 k 를 선택하게 될 확률을 의미하며, Ω 는 현재 경로(R_{cur})상에 삽입될 수 있는 고객의 집합을 나타낸다.

차량적재용량과 고객 서비스 시간 제약조건을 만족하지 못하여 현재 경로상에 삽입될 수 있는 고객이 존재하지 않을 때에는 다시 depot로 돌아온 뒤 새로운 경로를 구성하게 되는데, 이 때 초기 고객은 방문하지 않은 고객들 중 임의로 선택하여 초기 경로를 구성한다. 그 이후의 절차는 상기 명시된 절차와 동일하고, 모든 고객들을 방문할 때까지 반복된다.

3.2.1 지역갱신 규칙(Local Updating Rule)

지역 페로몬 업데이트는 각각의 개미들이 실행 가능한 경로를 구성한 후에 수행된다. 페로몬은 화학물질로써 시간이 지남에 따라 증발하며, 선택된 경로에만 쌓이게 되는데, 지역 페로몬 업데이트 계산식은 식 (18)과 같다.

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho)\tau_{ij}(t) + 1/L^* \quad (18)$$

여기서, ρ 는 페로몬 증발계수(pheromone evaporation parameter)로 0과 1사이의 값을 갖고, L^* 는 개미가 구성한 경로의 총 거리를 의미한다.

3.2.2 지역 탐색(Local Search)

개미군집시스템은 탐색 초기에 전역적 정보를 이용함으로써 탐색 능력이 우수하고, 전역 최적해 주위로 탐색이 가능하다. 반면 어느 정도 해의 개선이후에는 해의 수렴현상이 발생하며, 이로 인해 국부 최적해(local optimum)에 빠지는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 본 연구에서는 지역탐색 기법 중 swap 알고리즘을 반복적으로 적용하여 초기해를 개선한다.

• swap 알고리즘

IB-ACS에 의해 생성된 초기해에 swap 기법을 경로간 반복적으로 적용함으로써 이웃해를 생성한다. swap 기법은 두 차량경로에서 각각 하나의 노드를 선택하여 상호 교환하는 방법이다. 제약조건을 만족하여 교환이 가능하더라도 초기해의 개선이 있을 때만 교환이 이루어진다. 이러한 지역탐색방법을 통해 다양한 이웃해를 생성하여 집중적인 탐색을 통해 해를 개선한다.

swap 기법의 수행과정은 다음과 같다.

- 1단계 : 임의의 두 경로 선택
- 2단계 : 각각의 경로상에 하나의 노드 선택, 상호 교환
- 3단계 : 반복과정
 - 여러 이웃해 생성
- 4단계 : 가장 우수한 이웃해 선택

<Figure 1>은 swap 알고리즘의 수행과정의 예를 보여준다. 경로 1에 있는 4번 노드와 경로 2에 있는 3번 노드를 상호 교환하여 새로운 차량경로를 구성한다. 이러한 반복과정을 통해 생성된 이웃해 중 기존의 운행거리보다 단축된 차량경로를 선택하여 초기해를 개선한다.

3.2.3 전역갱신 규칙(Global Updating Rule)

전역 페로몬 업데이트는 모든 개미들이 경로를 구성한 후에 수행되는데, 가장 짧은 경로를 구성한 개미의 경로 S^{gb} 에 대해서만 식 (19)에 의하여 전역 페로몬 업데이트를 수행한다.

$$\begin{aligned} \tau_{ij}(t+1) &= (1-\rho)\tau_{ij}(t) + 1/L^{gb}, (i, j) \in S^{gb} \\ \tau_{ij}(t+1) &= (1-\rho)\tau_{ij}(t), (i, j) \notin S^{gb} \end{aligned} \quad (19)$$

여기서, L^{gb} 는 현재 iteration에서의 전역 최적경로 길이이고, S^{gb} 는 전역 최적경로를 나타낸다. 간선(i, j)가 전역 최적경로(S^{gb})에 속해 있으면 $1/L^{gb}$ 이 더해지고, 아니면 페로몬 증발계수 ρ 에 의해 페로몬 양은 줄어들게 된다. 이 전역 페로몬 업데이트는 짧은 경로에 더 많은 페로몬을 축적시켜 해의 수렴을 유도한다.

4. 실험 및 결과분석

본 연구에서 제안한 알고리즘은 C언어로 구현하였으며, 실험은 Pentium IV(2.4GHz, 512M RAM) PC환경 하에서 수행하였다. 본 연구에서의 실험은 축소실험과 확대실험으로 구분하였다. 먼저 축소실험에서는 수리모형을 검증하기 위하여 수요지가 7개로 구성된 소규모 예제에 대하여 CPELX 결과와 IB-ACS 알고리즘의 결과를 비교하였고, 확대실험에서는 VRPSDP-TW에 관한 기존 예제가 존재하지 않으므로 Solomon(1987)의 VRPTW예제와 Park(2008)의 VRPSDP예제에 적용하여 기존 연구의 결과값과 비교를 통해 본 연구에서 제안한 알고리즘의 효율성을 평가하고, 시간제약이 있는 VRPSDP에 대한 예제를 생성하여 결과값을 도출하였다.

4.1 축소실험

본 연구에서 제시한 수리모형 검증을 위하여 ILOG CPLEX 11.0를 이용하여 수요지 7개, 차량 2대로 구성된 차량의 최적경로를 산출하였다. 수요지 정보는 <Table 1>과 같다.

예제의 수리모형은 총 255개의 제약식과 총 128개의 이진변수로 구축되었으며, ILOG CPLEX와 IB-ACS 알고리즘의 결과 비교는 <Table 2>와 같다.

실험결과, ILOG CPLEX와 IB-ACS 알고리즘이 동일한 결과

값을 산출함으로써 본 연구에서 제시한 수리모형의 타당성을 입증하였다. 그러나 소규모에 문제에 대해서는 계산시간의 차이가 매우 작으나 고객의 수가 많아질수록 ILOG CPLEX에 의한 최적해 산출시간이 장시간이 소요되므로 대형 문제에 대해서는 기존 연구의 휴리스틱 알고리즘 결과값과 비교하여 알고리즘의 효율성을 판단한다.

4.2 확대실험

4.2.1 시간제약이 있는 차량경로문제(VRPTW)

수요지가 25개 구성된 Solomon(1987) 예제 중 RC1타입을 선정하여 본 연구의 알고리즘에 적용하였다. 기존 연구에서 알려진 Best Solution과 결과값 비교를 통하여 알고리즘의 효율성을 검증하였으며, 입력 파라미터 설정을 위하여 RC101에 대하여 사전 실험을 하였다. 기존문헌 연구를 분석해본 결과 개미 수(m)는 모든 수요지에 대한 탐색이 가능하도록 수요지 수와 동일하게 설정하고 페로몬 유지율(ρ)은 축적된 페로몬 정보의 차이가 커질 때 좋은 결과값을 얻어 0.9로 설정하였다. 페로몬과 휴리스틱 정보의 상대적 영향을 나타내는 파라미터 α, β 는 종료조건 100회를 기준으로 [0.1, 1.0]에서 각각 0.1씩 변화시키면서 실험한 결과 α, β 값이 서로 같을 때 가장 좋은 결과를 도출하여 α, β 는 각각 1로 설정하였다. 종료조건 횟수는 개미 수(m)와 페로몬 유지율(ρ), α, β 를 모든 설정한 이후 [100, 1000]에서 100회씩 변화시키면서 실험한 결과 종료조건 500회 이후에도 최선값이 동일하여 500회로 설정하였다.

<Table 3>은 본 연구의 알고리즘에 적용한 결과값과 기존 연구의 Best Solution을 비교한 결과이다. 실험결과 RC101예제를 제외하고는 모든 예제에 대하여 오차율 0.4% 이내로 Best

Table 2. Comparison between results of ILOG CPLEX and IB-ACS

	ILOG CPLEX	IB-ACS	Travel route
Total distances	174.75	174.75	route 1 : 0-7-2-4-3-0
Run time (sec)	2.45	0.17	route 2 : 0-5-6-1-0

Table 1. Customer data of mathematical model validation

Customer	x	y	Demand		Service time	Time windows	
			Delivery	Pick-up		Lower	Upper
0	25	25	-	-	-	0	230
1	3	22	23	-	9	147	197
2	29	13	14	-	6	96	146
3	42	19	22	15	15	113	163
4	44	5	13	23	14	88	138
5	36	40	17	21	15	104	154
6	32	45	-	25	10	128	178
7	15	3	-	13	5	17	67

Table 3. Comparison between results of Best-Solution and IB-ACS for RC 1 type

Type	Best solution		IB-ACS		Gap(%)
	Total distance	No. of vehicles	Total distance	No. of vehicles	
RC101	461.1	4	473.5	4	2.7
RC102	351.8	3	352.7	3	0.3
RC103	332.8	3	333.9	3	0.3
RC104	306.6	3	307.1	3	0.2
RC105	411.3	4	412.8	4	0.4
RC106	345.5	3	346.5	3	0.3
RC107	298.3	3	298.9	3	0.2
RC108	294.5	3	295.4	3	0.3
Average	350.24	3.25	352.60	3.25	0.7

Solution과 거의 동일한 결과를 도출하였다. 평균 운행거리 측면에서도 Best Solution과 평균 오차율 0.7% 이내로 비교적 우수한 해를 도출하였음을 알 수가 있다.

<Table 4>는 본 연구에서 제안한 IB-ACS 알고리즘과 기본적인 ACS 알고리즘을 수요지가 25개 구성된 R1 타입 예제에 적용하여 차량운행거리를 비교한 것이다. 실험결과 차량 수는

두 알고리즘이 동일하지만 차량운행거리는 IB-ACS가 ACS보다 평균 약 2.7% 개선된 결과를 도출하여 IB-ACS의 우수함을 보여준다.

4.2.2 배달과 수거를 동시에 수행하는 차량경로문제(VRPSDP)
배달과 수거를 동시에 수행하는 차량경로문제에 대한 예제는

Table 4. Comparison between results of IB-ACS and ACS for R1 type

Type	ACS		IB-ACS		Gap(%)
	Total distance	No. of vehicles	Total distance	No. of vehicles	
R101	625.2	8	618.3	8	-1.1
R102	581.9	7	569.0	7	-2.2
R103	472.5	5	465.5	5	-1.5
R104	443.4	4	427.5	4	-3.6
R105	543.3	6	537.3	6	-1.1
R106	489.1	5	482.5	5	-1.3
R107	434.7	4	433.6	4	-0.3
R108	420.7	4	402.8	4	-4.3
Average	522.95	6	510.55	6	-2.7

Table 5. Customer data of VRPSDP

Customer	Coordinate		Demand		Customer	Coordinate		Demand	
	x	y	Delivery	Pick-up		x	y	Delivery	Pick-up
1	95	75	1300	1000	8	81	90	1000	1000
2	45	20	0	600	9	10	70	1300	800
3	47	100	900	800	10	18	40	1100	300
4	40	70	700	800	11	110	53	1400	850
5	114	90	1200	130	12	68	60	1300	700
6	72	20	1000	500	13	96	48	1100	1300
7	132	60	500	1600					

Note) Depot : (60, 60), 차량 4대, 용량 : 4000.

수요지가 13개로 구성되어 있고, ILOG CPLEX 11.0으로 최적해를 산출한 Park(2008)의 예제를 본 연구의 알고리즘에 적용하여 결과값을 비교하였다. 수요지 정보는 <Table 5>와 같다.

<Table 6>은 ILOG CPLEX에 의한 최적해와 본 연구의 알고리즘에 적용하여 도출한 결과값을 비교한 것이다.

실험결과 ILOG CPLEX에 의한 최적해와 동일한 결과값을 도출하였고 계산시간 측면에서는 ILOG CPLEX에 의한 소요시간보다 훨씬 빠른 0.82초 만에 최적해를 도출함으로써 본 연구의 알고리즘의 효율성을 입증하였다.

4.2.3 시간제약이 있는 VRPSDP

4.2.3.1 실험 설계

시간제약이 있는 VRPSDP에 대한 예제는 Dethloff(2001)가 제안한 예제 생성방법에 따라 실험문제를 구성하였다. 50개의 지점들로 구성된 고객들은 [100, 100]의 정방형의 구역에 위치하여 지리적으로 다른 두 가지 형태로 구성된다. 50개 지점으

Table 6. Comparison between results of ILOG CPLEX and IB-ACS

	ILOG CPLEX	IB-ACS	Travel route
Total distance	554.67	554.67	Route 1 : D-8-1-5-7-D Route 2 : D-11-13-6-2-D
Run time(sec)	1478.66	0.82	Route 3 : D-10-9-3-4-D Route 4 : D-12-D

로 구성된 고객지점들이 임의로 분포되어 있는 SCA(scattered) 타입과 도시 집중적인 측면을 고려하는 CON(concentrated)타입의 두 유형의 문제이다. CON타입은 구성되는 고객지점의 50%는 SCA타입과 동일하게 분포되고 나머지 50%는 [100/3, 200/3]의 구간에 걸쳐 균등하게 분포된다. 따라서 중앙의 1/9의 영역은 좀 더 도시 중심적인 구성을 이루게 된다. 고객지점의 수요량은 [1, 100]의 구간에서 임의로 배달량 d_j 를 생성하고 수거량 p_j 는 $(0.5 \times r_j) \times d_j$ 의 수식을 이용하여 생성한다. 여기

Table 7. Customer data of SCA103 problem

Customer	Coordinate		Demand		Service time	Time windows		Customer	Coordinate		Demand		Service time	Time windows	
	x	y	Delivery	Pick-up		Lower	Upper		x	y	Delivery	Pick-up		Lower	Upper
1	82	72	90	65	31	109	139	26	65	98	32	24	11	0	184
2	36	20	58	66	25	30	60	27	57	61	61	73	27	0	183
3	63	84	64	59	25	99	129	28	39	82	28	33	12	154	184
4	97	77	39	38	15	0	200	29	43	84	23	28	10	0	187
5	4	65	90	76	33	88	118	30	98	97	87	89	35	0	194
6	77	36	42	52	19	135	165	31	16	64	62	84	29	28	58
7	51	17	29	17	9	0	189	32	51	5	38	36	15	175	205
8	62	31	85	70	31	0	185	33	1	65	62	64	25	135	165
9	30	7	50	48	20	0	181	34	31	98	30	26	11	77	107
10	32	14	33	42	15	0	209	35	24	59	71	55	25	0	197
11	83	55	61	42	21	0	190	36	99	93	26	34	12	0	192
12	60	60	77	94	34	0	203	37	63	49	50	32	16	0	185
13	26	55	51	54	21	87	117	38	59	68	12	14	5	0	203
14	35	97	52	56	22	25	55	39	43	8	50	54	21	86	116
15	38	14	66	43	22	80	110	40	12	15	32	48	16	0	188
16	10	62	71	67	28	74	104	41	42	47	7	7	3	171	201
17	70	21	5	7	2	93	123	42	27	17	51	43	19	0	192
18	74	76	82	58	28	159	189	43	26	7	64	55	24	0	206
19	83	41	47	40	17	149	179	44	42	59	39	22	12	43	73
20	54	54	63	37	20	0	188	45	14	76	27	17	9	131	161
21	6	28	96	79	35	0	191	46	84	52	80	119	40	0	182
22	37	33	22	16	8	119	149	47	63	33	29	34	13	82	112
23	24	69	59	65	25	27	57	48	21	88	16	14	6	0	196
24	15	25	40	43	17	154	184	49	73	12	33	17	10	0	208
25	90	53	39	20	12	46	76	50	30	23	95	65	32	78	108

Table 8. The experimental result of SCA103 problem

Vehicle number	Travel route	Loading amounts	
		Delivery	Pick-up
1	0-14-34-48-45-28-29-0	176	174
2	0-43-40-21-24-0	232	225
3	0-23-16-5-33-0	282	272
4	0-4-30-36-38-0	164	175
5	0-20-27-12-3-26-0	297	287
6	0-11-25-46-6-19-0	269	273
7	0-8-15-39-9-10-0	284	257
8	0-31-35-13-0	184	193
9	0-7-49-17-47-37-0	146	107
10	0-1-18-0	172	123
11	0-2-42-50-22-41-0	233	197
12	0-44-0	39	22
13	0-32-0	38	36
Total travel distance		1,329.9	

서 r_j 는 $[0, 1]$ 의 구간에서 임의로 생성되는 난수이다.

고객지점의 서비스시간대 설정은 Solomon(1987)의 VRPTW 예제 생성방법을 참고하였고 Type 1의 경우에는 차량용량은 300으로 동일하고, 차고지의 시간제약은 230으로 설정하였다. 고객지점의 서비스 시간대 폭은 101~104문제는 30단위시간, 105~108문제는 60단위 시간이다. 각 실험그룹별로 50개 수요지 중 시간대를 요구하는 지점의 빈도는 100%, 75%, 50%, 25%로 구분되어 있다. 예를 들어 SCA103예제인 경우에는 전체 고객의 50%만이 서비스 시간대 폭이 60단위 시간이고 나머지 50%는 서비스 시간대 폭이 180단위시간 이상이다. SCA103예제 생성방법은 50%의 고객지점들의 하한값을 (20, 180)구간에서 임의로 생성하여 그 값에 60을 더하였고, 나머지 50%의 고객지점들은 시간대의 하한값이 0이고, 상한값은 (180, 210)구간에서 임의로 생성하였다. Type 2의 경우에는 차량용량이 1,000으로 동일하고 차고지의 시간제약은 1,000으로 설정하였다. 고객지점의 서비스 시간대 폭은 201~204문제는 130단위 시간, 205~208문제는 240단위 시간이다. Type 2 역시 각 실험 그룹별로 50개 수요지 중 시간대를 요구하는 지점의 빈도는 100%, 75%, 50%, 25%로 구분되어 있다. CON103예제인 경우 50%의 고객지점들의 시간대 폭은 240단위 시간, 그 시간대의 하한값은 (20, 740)구간에서 임의로 생성하고 나머지 50%의 고객지점들은 시간대의 하한값은 0이고 상한값은 (950, 980)구간에서 임의로 생성하였다. 고객의 서비스 시간은 각 고객의 서비스 물량에 비례하는 시간을 정하기 위하여 배달량과 수거량을 합한 물량에 약 0.2배가 소요되는 것으로 가정하였다. <Table 7>은 본 연구의 실험설계에 따라 구성한 SCA103에 대한 수요지 정보이다. SCA103 예제는 차량용량이 300으로 동일하고 차고지의 시간제약은 230이며 전체고객의 50%는 서비스 시간대 폭이 30단위 시간이다.

4.2.3.2 실험결과

본 연구에서는 모든 예제에 대해 10번씩 실험을 하였고, 각 실험마다 반복횟수 500회를 설정하여 실험을 수행하였다. <Table 8>은 SCA103 예제를 IB-ACS 알고리즘에 적용하여 도출한 최선해를 나타낸 것이다. 10번의 실험과정 중 6번은 최선해인 1329.9와 동일한 결과를 나타냈고, 10번의 실험에 대한 평균 차량운행거리는 1331.6, 표준편차는 2.67로써 본 연구에서 제안한 알고리즘이 매 실험마다 안정적으로 해를 탐색할 수 있다고 판단된다.

IB-ACS 알고리즘에 의해 생성된 차량경로는 차량의 최대용량 300을 초과하지 않고 고객의 서비스 시간대 제약조건을 모두 만족함을 알 수가 있다. 따라서 SCA103 예제에 대한 사전실험을 통해 IB-ACS 알고리즘이 시간대 제약이 있는 VRPSDP 유형에도 모든 제약조건을 만족하며 실행 가능한 경로를 합리적인 시간 내에 구성할 수 있는 알고리즘임을 입증하였다.

<Figure 2>는 SCA103 예제에 대한 IB-ACS의 해 탐색과정의 예를 보여준다. 매 반복과정에서 얻어진 최선해를 차량운행거

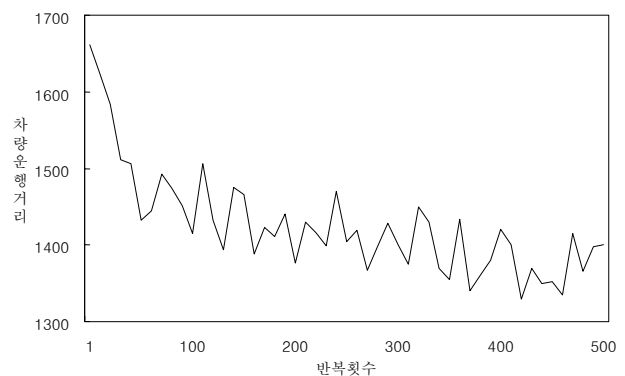


Figure 2. Converging process of SCA103 problem

리 측면에서 나타난 것이며, 차량 수는 16대에서 13로 감소하였고, 차량운행거리는 1661.6에서 1329.9까지 감소하였다.

본 연구에서 생성한 VRPSDP-TW의 모든 예제에 대한 실험 결과는 <Table 9>와 같다.

실험결과 고객의 서비스 시간대 간격이 넓어질수록 그리고 시간대 요구 고객의 수가 적어질수록 총 운행거리와 차량 수는 감소하는 반면 계산시간은 증가하였다. SCA 타입의 경우 차량용량이 작고 서비스 시간대 간격이 좁은 Type 1 예제보다 차량용량이 크고 서비스 시간대 간격이 넓은 Type 2 예제가 평균 총 운행거리는 약 1.5배 감소하고, 계산시간은 약 1.4배 증가함을 알 수가 있다. 고객의 서비스 시간대 간격이 넓고 시간대 요구 고객의 수가 적어질수록 경로상에 삽입 가능한 삽입 후보자 집단의 크기가 커짐에 따라 해 탐색공간이 커지므로 계산시간이 증가되는 것으로 분석된다.

5. 결론 및 향후 연구방안

지금까지 차량경로문제에 관한 연구는 배달 또는 수거 중 한 가지 형태의 작업을 수행하는 물류시스템을 대상으로 이루어져 왔으나 전통적인 배송물류(forward logistics)시스템에 재활용 또는 재생 가능한 제품 및 포장재들을 역방향으로 수송하는 역물류(reverse logistics)시스템을 통합한 물류시스템에서 차량운행계획을 수립하기 위해서는 배달과 수거작업을 동시

에 수행하는 차량경로문제에 관한 연구가 요구되는 실정이다.

본 연구에서는 배달과 수거작업을 동시에 수행하는 차량경로문제뿐만 아니라 시간제약(time windows)을 추가시킨 차량경로문제(VRPSDP-TW)를 통합적으로 다루었다. 또한 고객에 대한 서비스 시간을 처리물량에 비례하는 시간을 적용함으로써 보다 현실성을 반영하였으며 시간제약이 있는 VRPSDP 유형의 예제 생성방법을 제시하였다.

본 연구에서 제안한 IB-ACS 알고리즘은 크게 2단계로 구성된다. 먼저 1단계에서는 초기 경로 구성을 위하여 삽입기반의 개미군집시스템을 이용하여 삽입 기준값이 가장 큰 고객을 경로상 최적의 위치에 삽입하여 경로를 구성한다. 2단계에서는 초기경로가 구성되면 지역탐색방법인 swap 알고리즘을 적용하여 다양한 이웃해를 생성함으로써 초기해를 개선하였다.

VRPSDP-TW에 관한 연구는 본 연구에서 처음으로 시도되었으며, IB-ACS알고리즘의 효율성을 평가하기 위해서 Solomon(1987)의 VRPTW예제와 박기진(2008)의 VRPSDP 예제를 적용하였다. 실험결과, VRPTW 예제에 대해서는 기존 연구에서 최선해로 알려진 결과와 근접한 해를 도출하였고, VRPSDP 예제는 ILOG CPELX에 의한 최적해와 동일한 결과를 빠른 시간내에 도출하여 알고리즘의 성능을 입증하였다. VRPSDP-TW에 대한 실험은 차량용량과 고객의 서비스 시간대 간격에 따라 예제를 다르게 생성하여 본 연구의 알고리즘에 적용하였다. 실험결과, 차량용량과 고객의 서비스 시간 등과 같은 제약조건을 모두 만족하며 합리적인 시간내에 실행 가능한 경로를 구

Table 9. The experimental results of VRPSDP-TW problem

Type	No. of vehicles	Total distance	Run time (sec)	Type	No. of vehicles	Total distance	Run time (sec)
SCA101	16	1659.5	741.4	CON101	15	1116.0	884.1
SCA102	15	1562.9	797.0	CON102	11	945.4	970.1
SCA103	13	1329.9	866.8	CON103	10	938.9	1087.3
SCA104	11	1209.2	960.1	CON104	10	910.6	1226.5
SCA105	15	1487.4	841.2	CON105	12	955.3	964.5
SCA106	13	1368.0	988.6	CON106	11	958.7	1055.6
SCA107	13	1425.6	1100.5	CON107	10	845.2	1287.2
SCA108	12	1332.7	1321.4	CON108	10	846.4	1455.2
Average	13.5	1421.9	952.1	Average	11.1	939.6	1116.3
SCA201	4	1170.4	1030.2	CON201	4	926.5	1143.1
SCA202	4	1014.3	1155.2	CON202	4	881.5	1254.5
SCA203	3	986.8	1267.5	CON203	3	714.4	1333.2
SCA204	3	753.3	1445.6	CON204	3	676.2	1514.1
SCA205	3	1098.1	1204.3	CON205	3	745.8	1298.5
SCA206	3	975.8	1324.5	CON206	3	730.5	1356.7
SCA207	3	845.9	1555.6	CON207	3	693.4	1607.4
SCA208	3	784.0	1612.2	CON208	3	642.5	1701.4
Average	3.25	953.6	1324.4	Average	3.25	751.4	1401.1

성하였다.

향후 연구방안으로는 본 연구에서 다루지 않은 다용량(heterogeneous), 다중차고(multi-depot) 등의 제약사항을 추가로 고려한 연구가 필요하며, 고객의 배달과 수거의 물량이 사전에 정확히 알려져 있지 않은 확률적 상황의 VRPSDP에 대한 연구가 필요하다. 또한 본 연구에서는 총 차량운행거리 최소화를 목적으로 알고리즘을 구축하였으나 현실적으로 고유가 시대와 인건비 상승으로 인하여 화물 운송회사 뿐만 아니라 운송과 관련된 각종 공공기관이나 택배회사, 배달 업계에서는 총 차량운행거리보다 운행비용이나 운행시간에 큰 관심을 가지고 있다. 만약 차량운행거리가 증가하더라도 운행비용이나 시간이 감소하면 그 경로를 선택할 것이다. 따라서 향후 연구에서는 차량운행거리 최소화와 더불어 차량운행비용이나 차량이동시간을 최소화하기 위한 다목적 알고리즘의 개발이 필요하다.

참고문헌

- Bianchessi, N. and Righini, G. (2007), Heuristic Algorithms for the Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pick-up and Delivery, *Computer and Operational Research*, **34**(2), 578-594.
- Chung, E. Y. and Park, Y. B. (2004), A Genetic Algorithm for Vehicle Routing Problems with Mixed Delivery and Pick-up, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, **30**(4), 346-354.
- Crispim, J. and Brandao, J. (2005), Metaheuristics Applied to Mixed and Simultaneous Extensions of Vehicle Routing Problems with Backhauls, *Journal of the Operational Research Society*, **56**, 1296-1302.
- Dantzig, G. B. and Ramser, J. H. (1959), The Truck Dispatching Problem, *Management Science*, **6**, 80-91.
- Dethloff, J. (2001), Vehicle Routing and Reverse Logistics : the Vehicle Routing Problem with Simultaneous Delivery and Pick-up, *OR Spectrum*, **23**, 79-96.
- Dorigo, M. and Di Caro, G. (1999), The Ant Colony Optimization Metaheuristic, *New Ideas in Optimization*, McGraw-Hill, New York.
- Lee, D. H., Kim, H. J. and Kim, J. S. (2008), Reverse Logistics : Research Issues and Literature Review, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, **34**(3), 270-288.
- Min, H. (1989), The Multiple Vehicle Routing Problem with Simultaneous Delivery and Pick-up Points, *Transportation Research A*, **23**, 377-386.
- Park, G. J. (2008), A Vehicle Routing Problem to Minimize the Transportation Cost with Simultaneous Delivery and Pick-up, *Korea National Defense University*, Master Thesis, 42-45.
- Pisinger, D. and Ropke, S. (2007), A General Heuristic for Vehicle Routing Problems, *Computer and Operational Research*, **34**(8), 2403-2435.
- Solomon, M. M. (1987), Algorithm for the Vehicle Routing and Scheduling Problems with Time Window Constraints, *Operations Research*, **35**, 254-265.
- Tang, F. A. and Galvao, R. D. (2006), A Tabu Search Algorithm for the Vehicle Routing Problems with Simultaneous Pick-up and Delivery Service, *Computer and Operational Research*, **33**, 595-619.
- Zhang, T. and Tian, W-X. and Zhang Y-E. (2007), RLC_ACS : An Improved Ant Colony Algorithm for VRPSDP, *Proceedings of the Sixth International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, 978-983.