

역물류 환경을 고려한 복수차고지 다용량 차량경로문제*

정영훈** · †김각규** · 이상헌**

Dual-Depot Heterogeneous Vehicle Routing Problem Considering Reverse Logistics

Young-Hoon Jung** · †Gak-Gyu Kim** · Sang-Heon Lee**

■ Abstract ■

In this paper, we deal with the dual-depot heterogeneous vehicle routing problem with simultaneous delivery and pick up(DH-VRPSDP) in reverse logistics. The DH-VRPSDP is a problem of designing vehicle routes in a day of given vehicle to minimize the sum of fixed cost and variable cost over the planning horizon. Each customer can be visited only once according to the service combinations of that customer. Due to the complexity of the problem, we suggest a heuristic algorithm in which an initial solution is obtained by changing the customer and the vehicle simultaneously and then it is improved. A performance of the proposed algorithm was compared to both well-known results and new test problems.

Keywords : Dual-Depot, Heterogeneous, Vehicle Routing Problem, Heuristic

논문접수일 : 2011년 11월 16일 논문수정일 : 2012년 02월 01일 논문게재확정일 : 2012년 02월 21일

* 본 논문은 2011년도 한국경영과학회 추계학술대회 경쟁부문에 제출하여 우수논문상을 수상한 논문임.

논문의 내용을 일부 보완, 확장한 논문이며 소정의 심사과정을 거쳐 게재 추천되었음.

** 국방대학교 운영분석학과

† 교신저자

1. 서 론

군 및 민간에서는 수요부대 혹은 고객에 대한 효과적인 배송/회수 시스템 구축을 위해 노력하고 있다[3]. 군에서는 수송 운용시 수송능력의 최대 활용을 강조하고 있고 군 특성상 수송자산의 미사용이나 잘못된 사용으로 인해 필요한 수송소요를 적기에 충족시키지 못하였을 경우에는 국지적인 전투뿐만 아니라 전쟁의 승패와도 직결되는 결과를 초래할 수 있다. 또한 군은 수송 운용시 유휴차량의 최소화를 위하여 귀로수송의 최대한 활용을 강조하고 있으며 이를 통해 효과적인 배송/회수 시스템을 구축하려 노력하고 있다[1, 6]. 또한 민간기업에서의 물류시스템은 생산자에서 최종 소비자에 이르는 생산물품의 수·배송에만 집중되어 왔다. 그러나 최근에는 많은 산업에서 기존의 수송 시스템에 역방향 물류 시스템을 통합하려는 시도가 이루어지고 있다. 전통적 배송물류 시스템에 재활용 또는 재생 가능한 제품 및 포장재들을 역방향으로 수송하는 역물류(reverse logistics)시스템을 통합한 환경 친화적 물류시스템을 구축하려는 노력을 기울이고 있다[2, 15].

국내 환경을 살펴보면 2003년 정부는 기존의 생산자책임원칙에 의해 운영해오던 예치금제도를 보완 및 개선하여 생산자 책임 재활용(Extended Producer Responsibility, 이하 EPR) 제도를 시행하고 있다. 2008년에는 생산자 책임재활용 의무 대상품목은 전자제품을 비롯한 타이어, 사무용기와 합성수지포장재 등 2003년에 비해 그 대상품목이 확대되어 실시되었다. EPR은 자원의 절약과 재활용 촉진에 관한 법률시행령에 따라 재활용이 가능한 폐기물(TV, 냉장고 등)의 일정량 이상을 재활용하도록 생산자에게 의무를 부여하는 제도로, 종전의 생산자들이 재활용이 쉬운 재질 구조의 제품을 생산하여 이를 판매하는 시점까지만 책임을 지고 사용 후 폐기물은 사용자 책임이었으나, 이제는 사용 후 발생하는 폐기물의 재활용까지 생산자 책임으로 확대한다는 의미이다.

국외에서는 독일, 프랑스 등의 유럽 국가 대부분과 일본, 호주뿐만 아니라 멕시코 브라질 등 남미 지역까지 확대 적용되고 있는 세계적인 추세이며 이에 대하여 국내 기업들도 적극적으로 대처하고 있고 재활용이나 폐기물처리에 대한 관심을 높이고 있다[8].

이러한 변화된 물류시스템 환경 하에서 기업에서는 물류비용 절감을 위해 기존의 배송 프로세스에 역방향의 수송프로세스를 동시에 고려한 최적의 차량운행경로계획을 수립하여 운영하는 것이 매우 중요하다[4, 5]. 최적의 차량운행경로계획이란 전체 차량의 운행거리를 최소화하고, 운행 차량의 수를 줄이며, 차량의 적재용량을 최대한 활용하여 고객이 원하는 서비스 시간대에 고객의 수요를 만족시키는 것이다. 따라서 각 차량은 동일한 수요지점을 중복 방문하지 않으며, 가능한 한 하나의 차량이 많은 수요지점을 방문하도록 차량경로계획을 수립해야 한다.

차량경로문제는 차고지(depot)에서 출발한 차량이 여러 곳에 흩어져 있는 고객들의 요구를 만족시키면서 출발지로 복귀하는데 소요되는 최단거리를 구하는 문제로 일반적인 차량경로문제의 목적함수는 총 운행거리의 최소로 설정되며, 차량용량, 시간 제약, 다회방문, 확률적 상황, 차량운행주기 등 제약 조건에 따라 다양한 형태로 폭넓게 연구되고 있다. 이 중 배달과 수거를 한 지점에서 동시에 받을 수 있는 배달과 수거 동시고려하 차량경로문제(Vehicle Routing Problem With Simultaneous Deliveries and Pickups, VRPSDP)는 1989년 Min에 의해 처음 소개된 이후 1990년대는 큰 주목을 받지 못하였으나, 2000년 이후 역물류 관점의 물류 시스템의 필요성이 커지면서 활발한 연구가 이루어지고 있다. <표 1>은 VRPSDP의 연구에 대한 기존연구 내용을 연대순으로 요약하였다. 그러나 지금까지 대부분의 차량경로 문제(Vehicle Routing Problem, VRP)에서 복수차고지 및 다용량차량하 배달/수거를 동시에 고려한 연구는 미비한 실정이다[12].

따라서 본 연구에서는 변화된 물류환경에 적용

할 수 있도록 한 수요지에서 배달과 수거를 동시에 수행하고 용량이 다른 차량들을 이용하여 복수 차고지에서 배달 및 수거하는 제약을 추가한 차량경로문제를 다루고자 한다. 이러한 유형의 차량경로문제를 복수 창고가 존재하고 용량이 다른 차량을 이용하여 배달과 수거를 동시에 수행하는 차량경로문제(dual-depot heterogeneous vehicle routing problem with simultaneous delivery and pickup, 이하 DH-VRPSDP)라고 칭하고 이 문제를 효과적으로 풀 수 있는 알고리즘을 제안하며, 차량 운행비용을 최소화하는 차량경로를 구하는데 그 목적이 있다.

2. 수리모형

본 장의 DH-VRPSDP 문제는 복수 차고지에서 다용량 차량을 이용하여 수요지에 대한 배달 및 수거 임무를 수행하는 것이며 차량의 총 운행비용의 합을 최소화하는 것을 목적으로 한다. 각 수요지의

위치와 수요는 사전에 알려져 있으며, 차량의 출발과 종착은 depot에서만 이루어지고, 각 차량의 경로에서 수거된 수거량은 모두 depot으로 회수되며, 각 수요지의 배달량과 수거량은 차량의 적재용량을 초과할 수 없다. 이때 모든 수요지에 대해 운행되는 차량의 총 운행비용이 최소가 되도록 한다.

DH-VRPSDP의 수리적 모형은 다음과 같다.

<Parameters>

M : 수요지 집합, $i \in M = \{1, \dots, m\}$

N : 차고지 및 수요지를 포함한 모든 지점의 집합,

$i \in N = \{0, 1, \dots, m+1\}$, $i=0, m+1$: depot

G : 차량 용량

V : 전체차량 집합, $k \in V = \{1, \dots, v\}$

B_1 : 차고지(0)에 포함되는 차량집합, $B_1 \in V$

B_2 : 차고지($m+1$)에 포함되는 차량집합, $B_2 \in V$

c_{ij} : 간선(i, j)의 거리, $i, j \in N$

p_i : 수요지 i 의 수거물량, $i \in M$

d_i : 수요지 i 의 배달물량, $i \in M$

<표 1> 유전자 표현

저 자	연구 년도	Solution approach	Remarks
Min	1989	Cluster-first, route-second for solving by TSP method	Clustering customers into groups
Halse	1992	클러스터를 경로 생성 이전에 먼저 적용하는 두 단계의 휴리스틱 제한	
Salhi and Nagy	1999	Insertion-based heuristic	
Dethloff	2001	mathematical formulation, insertion-based heuristic	역물류 관점
Tang and Calvao	2002	Alternative mathematical formulation	adapting methods of non-simultaneous
Angelelli and Mansini	2003	Branch and price algorithm	with time windows
Salhi and Nagy	2004	a local search heuristic	single and multi depot
Tang and Calvao	2006	Tabu search algorithm	
Bianchessi and Righini	2007	Local search and tabu search algorithm	
Zachariadis and Tanrantis and Firanoudis	2009	Hybrid metaheuristic algorithm	
Ai and Kachivichyanukul	2009	Particle swarm optimization algorithm	

f_k : 차량 k 의 고정비, $k \in V$

s_k : 차량 k 의 변동비, $k \in V$

$big C$: 매우 큰 숫자 상수

<Decision variable>

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

L_k : Depot 출발 시 차량 k 의 적재물량

q_{ik} : 수요지 i 방문 후 차량 k 의 적재물량

<수리 모형>

Minimize

$$\sum_{k \in V} \sum_{i \in M} \sum_{j \in M} c_{ij} x_{ijk} s_k + \sum_{k \in V} \sum_{i \in M} \sum_{j \in M} x_{ijk} f_k \quad (1)$$

Subject to

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

$$\sum_{j \in M} x_{0jk} = 1 \quad \forall k \in B_1 \quad (3)$$

$$\sum_{j \in M} x_{(m+1)jk} = 1 \quad \forall k \in B_2 \quad (4)$$

$$\sum_{i \in N} x_{ihk} - \sum_{j \in N} x_{hjk} = 0 \quad \forall h \in M, \forall k \in V \quad (5)$$

$$\sum_{j \in M} x_{(m+1)jk} = 0 \quad \forall k \in B_1 \quad (6)$$

$$\sum_{j \in M} x_{(m+1)jk} = 0 \quad \forall k \in B_1 \quad (7)$$

$$\sum_{j \in M} x_{0jk} = 0 \quad \forall k \in B_2 \quad (8)$$

$$\sum_{j \in M} x_{j0k} = 0 \quad \forall k \in B_2 \quad (9)$$

$$\sum_{k \in V} x_{iik} = 0 \quad \forall i \in N \quad (10)$$

$$L_k = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} x_{ijk} d_j = 0 \quad \forall k \in V \quad (11)$$

$$L_k - d_j + p_j - C(1 - x_{0ik}) \leq q_{jk} \quad \forall i \in M, \forall k \in B_1 \quad (12)$$

$$q_{ik} - d_j + p_j - C(1 - x_{0ik}) \leq q_{jk} \quad \forall i \in M, \forall j \in N, \forall k \in B_1 \quad (13)$$

$$L_k - d_j + p_j - C(1 - x_{(m+1)ik}) \leq q_{jk} \quad \forall i \in M, \forall k \in B_2 \quad (14)$$

$$q_{ik} - d_j + p_j - C(1 - x_{0ik}) \leq q_{jk} \quad \forall i \in M, \forall j \in N, \forall k \in B_2 \quad (15)$$

$$L_k \leq G \quad \forall k \in V \quad (16)$$

$$q_{ik} \leq G \quad \forall k \in V \quad (17)$$

위 수리모형의 목적식 (1)은 총 운행비용을 최소화하는 것이고 제약식 (2)는 각각의 수요지는 정확히 차량 한 대에 의해 서비스 받는 것을 의미한다. 제약식 (3)과 식 (4)는 각 차고지에 해당되는 차량은 차고지에서 한번만 출발가능하다는 것을 의미한다. 제약식 (5)는 각 차량은 연속된 경로로 운행하는 제약을 의미하고, 제약식 (6)~식 (9)는 모든 차량은 소속된 차고지가 아닌 다른 차고지에서 출발 및 도착을 할 수 없다는 의미이다. 제약식 (10)은 모든 차량은 동일지점에서 이동이 불가능하다는 의미이고, 제약식 (11)은 차고지 출발시 각 차량이 방문할 수요지의 적재물량을 의미한다. 제약식 (12), 식 (14)는 차량 k 가 첫 수요지 방문 후 차량의 적재물량을 초과할 수 없다는 것을 의미하고, 제약식 (13), 식 (15)는 운행 중 차량의 적재물량의 변화를 계산한다. 제약식 (16)과 식 (17)은 차량 k 가 차고지를 출발할 때와 각 수요지 방문시 차량 적재량은 차량 최대용량을 초과해서는 안 된다는 의미이다.

3. 실험 및 결과분석

NP-hard 문제인 DH-VRPSDP의 해결을 위해서는 발견적 기법의 적용이 필요하고, 그 중 유전자 알고리즘(GA)은 복잡한 해공간에 대한 탐색능력이 우수하여 변수와 제약이 많은 대형 수리문제를 푸는데 적합하다는 장점을 가지고 있어 본 연구에서는 GA를 적용하였다[10, 14]. 축소실험에서 문제의 최적값과 GA로 산출된 결과를 비교하여 알고리즘의 정확도(accuracy)를 검증한 후 확대실험에서 대형문제(large-scaled problem)에 적용하였다.

3.1 유전자 알고리즘

3.1.1 유전자 표현

유전자표현은 2개의 스트링으로 표현하였으며 차량의 수요지 방문 우선순위와 방문차량을 표현하였다. 유전자 표현은 다음 <표 2>과 같다.

<표 2> 유전자 표현

수요지 번호	1	2	3	4	5
우선순위	2	5	4	1	3
방문차량	1	2	1	3	2

위의 유전자 표현에서 수요지 번호는 오름차순으로 자동 배열되므로 유전자 표현에 구성하지 않았으며 우선순위는 수요지별 방문차량의 순서를 결정하고 방문차량은 수요지별로 방문하는 차량번호를 나타낸다. 우선순위를 고려하면 차량 1은 D-1-3-D, 차량 2는 D-5-2-D, 차량 3은 D-4-D의 경로를 가지게 된다. 여기서 D는 차고지를 의미한다.

3.1.2 초기해 생성/개선

초기해 개선을 위하여 지역해로의 조기 수렴을 방지하기 위한 임의 생성기법과 Swap 알고리즘[13]을 적용한 발견적 기법을 혼용하였다. 임의 생성기법은 해 공간의 전역 탐색기반을 마련하였으며 발견적 기법은 좋은 초기해가 우수한 최종해 산출에 큰 영향을 미치기 때문에 Swap 알고리즘을 병용하였다. Swap 알고리즘은 임의 생성된 초기해에 Swap 기법을 경로간 반복적으로 적용함으로써 이웃해를 생성하고 두 차량경로에서 각각 하나의 노드를 선택하여 상호 교환하는 방법이다. 제약조건을 만족하여 교환이 가능하더라도 초기해 개선이 있을 때만 교환이 이뤄지며 지역 탐색방법을 통해 다양한 이웃해를 생성하여 집중적인 해의 탐색을 통해 초기해를 개선한다.

3.1.3 적합도 평가

적합도 함수는 아래 식 (18)에서와 같이 거리의 합의 역수를 취하였다. 이는 운행비용이 적을수록 높은 적합도를 나타내도록 하였다.

$$fit(x) = \frac{1}{\sum_{k \in V_i \in M_j \in M} c_{ij} x_{ijk} s_k + \sum_{k \in V_i \in M_j \in M} x_{ijk} f_k} \quad (18)$$

3.1.4 선별

선별은 GA에서 일반적으로 많이 사용하는 룰렛

휠(roulette wheel) 기법을 이용하여 현재 해집단에서 다음세대 해집단을 구성할 염색체를 선정한다. 또한 엘리트 보존전략(elite strategy)을 적용하여 첫 번째 스트링을 차량 도착 우선순위로 표현하였기 때문에 같은 해가 다른 유전자로 표현될 수 있으므로 이러한 개체는 엘리트와 같이 생존시켜서 다음 세대에서 일정비율 1% 이내의 개체를 추가적으로 복제하여 전체적으로 세대의 적합도를 향상시켜 주었다.

3.1.5 교차

차량의 방문우선순위는 차량경로를 구성함에 있어서 우선순위가 중복되면 차량의 경로가 형성되지 않으므로 순서교차를 실시하여 우선순위가 중복되지 않도록 하였으며 수요지별 방문차량은 2점 교차(2-point crossover)를 실시하였다.

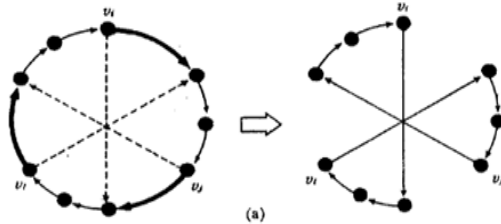
3.1.6 돌연변이

차량도착 우선순위는 교환에 의한 돌연변이, 방문차량은 점 돌연변이를 실시하였다. 해의 개선이 없이 일정 세대가 경과되면 돌연변이율을 단계적으로 증가시키는 변동 돌연변이율을 적용하여 지역해로의 탈출확률을 높였으며 해의 개선이 이루어지면 초기에 지정된 돌연변이율로 환원시켰다.

3.1.7 최종해 개선

최종해 개선과정은 k -opt 알고리즘(3-opt)을 적용하였다. 수행절차는 임의의 해밀턴 순환로에서 t 에서 k 개의 호를 제거하고 순환로 t 에 없던 k 개의 호로 대체하여 새로운 순환로를 생성한다. 새로 생성된 순환로를 기존 순환로 t 의 이웃(neighborhood)이라 하고 임의의 순환로 t 에는 다수의 이웃이 존재하게 된다. 이 이웃들을 순차적으로 조사하여 개선된(비용이 적은) 순환로를 구한다. k 값은 임의로 정할 수 있는 값이며 k 값에 따라 그 해를 k -opt이라 한다. 3-opt은 2-opt보다 훨씬 효과적이며 4-opt 이상은 추가되는 계산량에 비해 3-opt보다 크게 향상되지 않는다고 보고되어 있다. 3-opt의 호

대체과정은 다음 <그림 1>과 같다.



1	2	3	4	5	6	7	8	9	(a) 운행거리 120
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----------------------

1	5	6	7	2	3	4	8	9	110
---	---	---	---	---	---	---	---	---	-----

<그림 1> 3-opt 알고리즘에서 호의 대체

3.1.8 유전 파라미터

본 연구에서 사용한 파라미터는 기존 연구에서 제시된 모집단의 수, 종료세대수, 교배율 및 돌연변이율 등 문제에 따라 최적의 파라미터값을 찾아내는 것은 거의 불가능하므로 교배율, 돌연변이율, 최대 허용 돌연변이율에 대한 반복실험을 통해 알고리즘과 문제의 특성에 맞는 파라미터를 적용하였다.

3.2 실험 및 결과분석

본 연구의 수리모형 검증을 위하여 ILOG CPLEX 11.1을 이용하였으며, 유전자 알고리즘은 Microsoft Visual C++ 6.0으로 구현하였으며, PC(Core2 Duo 2.13GHz, 2G RAM)에서 실험하였다. 실험은 유전 파라미터 도출을 위한 반복실험을 수행하고, 도출된 유전파라미터를 적용한 유전자 알고리즘과 ILOG CPLEX 최적해 값을 비교하여 유전자 알고리즘의 효율성을 입증하며, 기존 예제 및 본 연구를 위해 생성한 실험예제에 적용을 하였다.

첫 번째 실험은 수리모형의 검증 및 비교실험 전에 유전자 알고리즘의 결과 값에 영향을 미칠 수 있는 많은 요소 중 교배율, 돌연변이율, 최대 허용

돌연변이율을 변경 적용함으로써 가장 효율적인 파라미터를 도출하였다. 두 번째는 앞에서 제시한 수리모형의 타당성을 검증하기 위하여(수요지 10개, 차량 4대, 2개 차고지)로 구성된 소규모 문제를 ILOG CPLEX로 도출한 결과를 유전자 알고리즘 결과와 비교하였다. 세 번째는 ILOG CPLEX로 산출이 불가능한 대형 문제의 경우에는 본 연구와 비교 가능한 연구사례가 제한되어 제약조건을 완화한 기존 문제와 비교를 하였으며 실험 조건에 따른 실험예제를 생성하여 유전자 알고리즘을 이용하여 산출한 결과를 제시하였다.

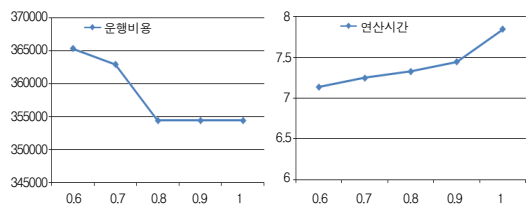
3.3 유전파라미터

유전파라미터 설정을 위한 실험대상은 교배율, 돌연변이율, 최대 허용 돌연변이율이며 최초 기본 입력 파라미터는 기존 연구에서 적용한 입력 파라미터의 평균값을 아래와 같이 적용하였다.

교배율	돌연변이율	최대 허용돌연변이율
0.8	0.08	0.3

3.3.1 교배율 선정

최적해 수렴속도에 영향을 미치는 교배율(P_c)이 높을 경우 알고리즘의 개방능력을 향상시킴으로 진화의 초기에 적합도가 높은 탐색공간을 찾는데 유리하지만 동시에 개방능력을 저하시킴으로써 어느 정도 좋은 해를 찾은 후에는 이 탐색공간 내에서 최적해로 수렴하는데 있어서 수렴속도를 저하시키는 요인으로 작용할 수 있다. 실험에 적용한 교배

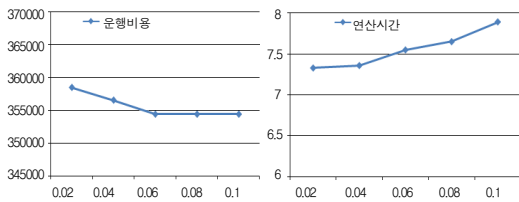


<그림 2> 교배율 변화에 따른 운영비용 및 연산 시간

율의 범위는 0.6~1.0으로 제한하였으며 10회씩 실험한 결과의 평균 총 운행거리와 연산시간을 도출한 결과는 <그림 2>와 같다. 교배율이 0.8이상이면 최적해는 변화가 없으며 연산시간만 더 증가하는 결과를 나타내어 교배율은 0.8로 설정한다.

3.3.2 돌연변이율 선정

돌연변이율(P_m)도 교배율과 같이 최적해 수렴속도에 영향을 미치는 파라미터로서 실험에 적용한 돌연변이율 변화범위는 0.02~0.1로 제한하였으며 10회씩 실험한 결과의 평균 총 운행거리와 연산시간을 도출한 결과는 <그림 3>와 같다. 돌연변이율이 0.06이상일 경우 최적해의 변화가 발생하지 않았으며 연산시간은 돌연변이율이 클수록 증가하는 결과를 보였다. 최적해의 큰 차이가 없으며 연산시간 측면에서 효과적인 점을 고려하여 돌연변이율은 0.02로 설정한다.



<그림 3> 돌연변이율 변화에 따른 운행비용 및 연산시간

3.3.3 최대 허용 돌연변이율

유전자 알고리즘이 복수해를 운용하기 때문에 지역 탐색능력은 뛰어나지만 SA(simulated annealing)에 비해 지역해에 도달했을 경우 이를 벗어나기 위해서는 상대적으로 아주 작은 돌연변이율에 의존할 수밖에 없다. 이러한 유전자 알고리즘의 단점을 보완하기 위해 일정 세대수가 진행되어도 해의 개선이 없으면 단계적으로 돌연변이율을 상승시켜 지역해에서 벗어날 확률을 높여주었으며, 지역해에서 벗어난 후에는 최초로 적용된 돌연변이율로 재조정하였다. 돌연변이율은 최초 설정된 0.02에서 설정한 세대수만큼 진행되어도 해의 개선에 변화

가 없으면 0.1~0.5까지 단계별로 상승시켰다. 최대 허용 돌연변이율 변화에 의한 해의 개선 효과는 크지 않으며 변화율이 클수록 무작위 탐색과 같아질 수 있고 연산시간만 증가하기 때문에 최대 허용 돌연변이율은 0.3으로 설정한다.

3.3.4 유전파라미터 설정

위 실험을 통하여 설정된 유전자 알고리즘의 유전파라미터는 <표 3>와 같다.

<표 3> 유전 파라미터

구분	적용값	구분	적용값
모집단수 (popsize)	50(개)	돌연변이율 상승조건	200(세대)
교배율(P_c)	0.80	최대 허용 돌연변이율	0.3
돌연변이율 (P_m)	0.02	종료 세대수	5000(세대)

3.4 수리모형 검증

수리모형 검증을 위해 실험설계에서 설정한 수요지 10개, 차량 4대, 차고지 2개를 기준으로 산출하였으며 ILOG CPLEX 11.1에 사용한 데이터를 유전자 알고리즘에 적용하여 최적값 확인을 통해 수리모형의 타당성을 검증하였으며, 수요지 증가를 통한 추가 실험을 통해 유전자 알고리즘의 필요성을 확인하였다. 적용 데이터는 <표 4> 및 <표 5>와 같다.

<표 4> 수요지정보

수요지	위치	배달량	수거량	수요지	위치	배달량	수거량
1	(20,98)	30	20	6	(57,21)	20	20
2	(59,73)	80	30	7	(37,58)	30	20
3	(27,4)	20	30	8	(53,43)	30	40
4	(79,79)	50	10	9	(6,55)	30	40
5	(46,56)	50	20	10	(96,93)	50	20

주) 차고지 1 : (2, 16), 차고지 2 : (84, 42).

〈표 5〉 차량정보

구 분	차고지 1		차고지 2	
	차량 1	차량 2	차량 3	차량 4
용 량	100	200	100	200
고정비	36,000	71,000	36,000	71,000
변동비	250	350	250	350

ILOG CPLEX를 이용한 수리모형과 유전자 알고리즘의 결과값은 <표 6>와 같이 수리모형 검증에 위한 실험결과 동일한 결과값을 나타낸다.

〈표 6〉 수리모형 및 유전자 알고리즘 결과

구 분	ILOG CPLEX		유전자 알고리즘	
	운행 비용	연산 시간(초)	운행 비용	연산 시간(초)
수요지 7, 차량 4	295,400	0.63	295,400	1.33
수요지 10, 차량 4	352,200	1.88	352,200	1.65
수요지 15, 차량 4	444,300	56	444,300	8.84
수요지 20, 차량 4	-	-	498,500	12.11

3.5 기존 문제 적용

기존의 배달과 수거를 동시에 고려한 차량경로 문제 중에서 다수 차고지, 다용량 차량을 동시에 고려한 예제가 존재하지 않으므로 결과 비교에 제한이 있어 CVRP의 일반적인 비교문제인 Eilon[7]의 Data 문제들과 Fisher Problem[9], Gribkovskaia et al.[11]이 제시한 문제를 본 연구의 알고리즘에 적용하였다. 본 연구의 알고리즘은 배달량 또는 수거량의 조정이 가능하도록 구축되었으며, 배달량만 고려한다면 수거량을 '0'으로, 수거량만 고려한다면 배달량을 '0'으로 설정이 가능하다. 배달량만을 고려한다면 기존 문제에 적용하여 비교가 가능하다. 총 운행거리 비교를 위해서 고정비는 '0', 변동비는 '1'로 조정하여 실험을 수행하였다. 기존 연구에서 제시한 최종해 및 적용결과는 다음 <표 7>, <표

8>과 같다.

〈표 7〉 기존 예제의 최종해

예 제		총 운행거리
Elion data	E-n22-k4	375
	E-n23-k3	569
	E-n30-k3	534
	E-n33-k4	839
Fisher problem	F-n45-k4	724
Gribkovskaia et al.		991

주) n33(수요지점 33개), k4(차량 4대).

〈표 8〉 기존 예제 적용결과

예 제	기존 연구결과	적용결과
E-n22-k4	375	375
E-n23-k3	569	567
E-n30-k3	534	531
E-n33-k4	839	836
F-n45-k4	724	723
Gribkovskaia et al.	991	954

3.6 복수차고, 다용량 문제 적용

복수차고, 다용량 문제에서는 100×100 2차원 유클리드 공간상에 차고지를 포함한 수요지의 좌표를 일양분포(uniform distribution)에 따라 무작위로 생성하고 수요지별 배달 및 수거량도 10~50사이에서 무작위로 생성한다. 차량은 차고지별로 2대씩 할당하고 차량의 용량은 100, 200으로 한정한다. 수요지는 20개, 30개로 설정하고 차량은 4대로 설정하여 실험을 수행하였다.

〈표 9〉 실험 예제

구 분	수요지(개)	차량(대)	차고지(개)
1	20	4	2
2	30	4	2

실험 1의 수요지 및 차량에 관한 정보는 다음 <표 10> 및 <표 11>과 같다.

<표 10> 수요지 정보

수요지	위치	배달량	수거량	수요지	위치	배달량	수거량
1	(65,74)	30	20	11	(37,55)	30	30
2	(44,9)	30	20	12	(43,60)	30	10
3	(58,7)	40	10	13	(7,12)	20	30
4	(13,15)	10	10	14	(15,76)	30	20
5	(99,61)	20	10	15	(15,5)	30	40
6	(42,48)	10	20	16	(85,52)	10	30
7	(46,44)	40	40	17	(98,53)	40	30
8	(28,18)	30	30	18	(63,34)	30	40
9	(35,52)	20	10	19	(69,41)	40	30
10	(27,8)	50	30	20	(21,88)	10	10

주) Depot(1) : (59,68), Depot(2) : (41,61).

<표 11> 차량 정보

구분	차고지 1		차고지 2	
	차량 1	차량 2	차량 3	차량 4
용량	100	200	100	200
고정비	36,000	71,000	36,000	71,000
변동비	250	350	250	350

실험 1은 <표 12>과 같이 용량이 작은 차량(100)이 배달/수거를 고려하여 각각 4개의 수요지에 대해 밀집된 지역을 대상으로 경로가 형성되었다. 나머지 수요지는 용량이 큰 차량(200)이 각각 6개의 넓은 지역에 대하여 서비스를 수행하는 결과를 보여준다.

<표 12> 실험 결과

구분	차고지 1		차고지 2	
	차량 1	차량 2	차량 3	차량 4
경로	D→1→5→17→16→D	D→19→18→7→6→2→3→D	D→20→14→11→12→D	D→10→8→15→13→4→9→D
비용	98,800	138,900	102,500	148,400
총 운행비용	488,600			

실험 2의 수요지 및 차량에 관한 정보는 다음 <표 13> 및 <표 14>과 같다.

<표 13> 수요지 정보

수요지	위치	배달량	수거량	수요지	위치	배달량	수거량
1	(93,30)	30	20	16	(64,49)	10	20
2	(9,49)	10	10	17	(85,5)	20	20
3	(32,3)	10	20	18	(21,12)	40	30
4	(59,86)	20	10	19	(98,7)	30	40
5	(3,50)	10	20	20	(41,68)	20	40
6	(76,87)	20	20	21	(55,13)	30	20
7	(53,40)	10	20	22	(41,96)	30	40
8	(66,24)	20	10	23	(60,81)	20	30
9	(34,67)	10	20	24	(28,7)	10	10
10	(64,25)	10	30	25	(9,12)	10	20
11	(38,74)	10	10	26	(79,58)	30	10
12	(99,53)	10	20	27	(42,57)	10	30
13	(46,75)	50	30	28	(18,80)	20	10
14	(82,76)	40	10	29	(63,12)	10	10
15	(16,36)	30	20	30	(90,80)	10	30

주) Depot(1) : (18,24), Depot(2) : (82,37).

<표 14> 차량 정보

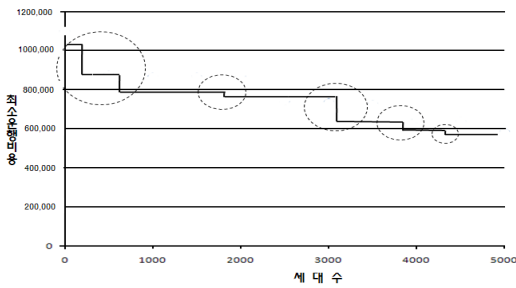
구분	차고지 1		차고지 2	
	차량 1	차량 2	차량 3	차량 4
용량	100	200	100	200
고정비	36,000	71,000	36,000	71,000
변동비	250	350	250	350

한편, 복수차고/다용량 문제 결과는 다음 <표 15>와 같다. <그림 4>는 이 실험에 대하여 5,000세대 진행한 결과를 가지적으로 보여준 것이다. <그림 4>를 보면 약 800세대 까지는 초기해가 급격하게 개선되는 모습을 볼 수 있다. 이는 Swap 알고리즘 적용 결과라고 판단되며 이후 약 3,000세대 까지는 지역해에 빠진 상태로 거의 해의 개선은 발생하지 않았다. 이후 변동 돌연변이율을 통해 지역해를 벗어날 확률을 높여줌으로써 약간의 해 개선과정을

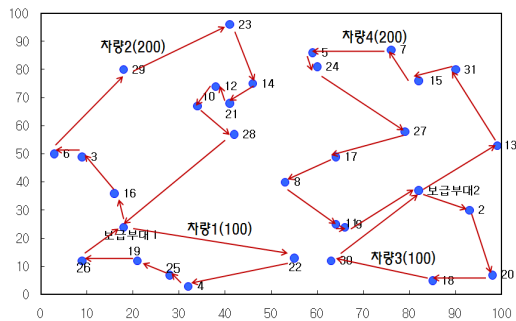
거처 최종해를 산출하였다.

<표 15> 실험 결과

구 분	차고지 1		차고지 2	
	차량 1	차량 2	차량 3	차량 4
경로	D→21 →3→24 →18→25 →D	D→15 →2→5 →28→22 →13→20 →11→9 →27→D	D→1 →19→ 17→29 →D	D→12→ 30→14 →6→4 →23→ 26→16 →7→ 10→8 →D
비용	108,500	179,600	99,600	190,100
총 운영비용	577,800			



<그림 4> 세대수 변화에 따른 최적해 변화



<그림 5> 최적해 각 차량별 경로

<그림 5>는 실험 2의 최적해 각 차량별 경로를 나타낸 것이다. 용량이 작은 차량(100)은 수요지의 배달/수거량을 고려하여 3~5개 수요지가 밀집된 지역을 대상으로 서비스를 수행하며 용량이 큰 차

량(200)은 나머지 수요지에 대한 서비스를 수행하는 것을 볼 수 있다. 전체 수요지 대상으로 보면 차량 대수를 고려하여 4개의 큰 지역으로 자동적으로 클러스터링 됨을 파악할 수 있다.

4. 결론 및 향후 연구방향

본 연구에서는 역물류환경을 고려한 배달과 수거를 동시에 실시하며 다수의 창고에서 다용량의 차량을 이용하는 차량경로문제를 다루었다. 기존 연구에서 단일 창고에서 초기해 개선을 위한 알고리즘을 적용하였거나 시간제약을 추가하여 문제를 다룬 것과 큰 차이점이 있다. 본 연구에서는 효율적인 해의 탐색을 위해 초기해 개선에 많은 중점을 두었고, 이를 위해 임의 생성된 초기해를 그대로 사용하지 않고 Swap 알고리즘을 이용하여 개선을 하였다. 그리고 최종해 개선과정은 3-optimal 알고리즘을 이용하여 개선을 하였다. 본 연구에서는 VRPSDP에 복수 창고, 다용량 차량을 적용하는 알고리즘을 제시하였고, 기존 예제와의 비교를 통해 알고리즘의 효율성을 확인하였으며, 문제 특성을 고려시 유사 예제와의 비교가 제한되어 실험 예제를 구성하여 해를 산출하였다. VRPSDP는 우리 실생활에 적용가능한 범위가 굉장히 넓으며 특히나 가전제품류의 배달 및 회수, 음료 배달 및 공병 회수, LPG 가스배달 및 보관통 회수, 우체국 택배 시스템 등에 적용되고 있으나 타 차량경로문제에 비하여 많은 연구가 이뤄지지 않았다.

향후 연구방향으로는 본 연구에서 제시한 다용량 차량을 적용하였을 경우 차량의 크기에 따른 비용요소를 고려하여 최소비용으로 경로를 구축하는 알고리즘에 대한 연구가 필요하다고 판단된다. 알고리즘 구현 시에는 clustering 기법을 추가한다면 초기해 생성 및 개선과정에서 더 효과적일 것으로 판단된다. 또한 민간업체의 물류 시스템이나 택배 시스템과의 연계를 통해 실제 이루어지는 배달이나 수거의 과정을 연구하여 현실에 적용 가능한 모형을 구축하는 것도 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] 이상현, 김용대, “시간제약하 배달과 수거를 동시에 수행하는 차량경로문제를 위한 개미군집 시스템”, 『대한산업공학회지』, 제35권, 제2호 (2009), pp.160-170.
- [2] 황홍석, 조규성, 홍창우, “배달 및 수거를 고려한 차량운송계획 모델”, 대한산업공학회/한국경영과학회 춘계공동학술대회논문집, (2000), pp. 285-288.
- [3] 정영훈, 김각규, 이상현, “복수 차고지 및 다용량 차량하 배달/수거를 동시에 고려한 차량경로문제”, 한국경영과학회 추계학술대회논문집, 2011.
- [4] Bianchessi, N. and G. Righini, “Heuristic Algorithms for the Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pick-up and Delivery,” *Computer and Operational Research*, Vol.34, No.2(2007), pp.578-594.
- [5] Crispim, J. and J. Brandao, “Metaheuristic applied to mixed and Simultaneous Extensions of Vehicle Routing Problems with Backhauls,” *Journal of the Operational Research Society*, Vol.56(2005), pp.1296-1302.
- [6] Deif, I. and L. Bodin, “Extension of the Clarke and Wright Algorithm for Solving the Vehicle Routing Problem with Backhauling,” In Kidder A(ed), Proceedings of the Babson college conference on Software Uses in Transportation and Logistic Management, Babson Park, MA(1984), pp.75-96.
- [7] Dethloff, J., “Vehicle Routing and Reverse Logistics : the Vehicle Routing Problem with Simultaneous Delivery and Pick-up,” *OR Spectrum*, Vol.23(2001), pp.79-96.
- [8] Eilon, S., C.D.T. Watson-Gandy, and N. Christofides, *Distribution Management Mathematical Modelling and Practical Analysis*, Griffin, London, 1971.
- [9] Emmanouil, E.Z., C.D. Tarantilis, and C.T. Kiranoudis, “A Hybrid Metaheuristics for the Vehicle Routing Problems with Simultaneous Delivery and Pick-up service,” Science Direct, 2007.
- [10] Fisher, M.L. and R. Jaikumar, “A Generalized Assignment Heuristic for Vehicle Routing,” *Networks*, Vol.11(1981), pp.109-124.
- [11] Gen, M. and R. Cheng, “Genetic Algorithm and Engineering Optimization,” John Wiley and Son, 2000.
- [12] Gribvoskaia, I., O. Halskau, and K. Myklebost, “Models for Pick-up and Deliveries from Depots with Lasso Solutions,” Molde University College, Norway, 2002.
- [13] Pisinger, D. and S. Ropke, “A General Heuristic for Vehicle Routing Problems,” *Computer and Operational Research*, Vol.34, No.8 (2007), pp.2403-2435.
- [14] Shtub. A., L.J. LeBlanc, and Z. Cai, “Scheduling programs with repetitive projects : A comparison of a simulated annealing, a genetic and a pair-wise swap algorithm,” *European Journal of Operational Research*, Vol8, No.1(1996), pp.124-138.
- [15] Talbi, E.-G., “Metaheuristics,” John and Sons Inc, 2009.
- [16] Wassan, N.A., G. Nagy, and S. Ahmadi, “A Heuristic Method for the Vehicle Routing Problem with Mixed Deliveries and Pickups,” *J. Sched*, Vol.11(2008), pp.149-161.