

유전자 알고리즘을 이용한 운행비용 최소화 다용량 차량경로문제

임무균 · 전진욱^{*}

국방대학교 운영분석학과

A Heterogeneous VRP to Minimize the Transportation Costs Using Genetic Algorithm

Mu Kyun Ym · Geonwook Jeon

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

A heterogeneous VRP which considers various capacities, fixed and variable costs was suggested in this study. The transportation cost for vehicle is composed of its fixed and variable costs incurred proportionately to the travel distance. The main objective is to minimize the total sum of transportation costs. A mathematical programming model was suggested for this purpose and it gives an optimal solution by using OPL-STUDIO (ILOG CPLEX). A genetic algorithm which considers improvement of an initial solution, new fitness function with weighted cost and distance rates, and flexible mutation rate for escaping local solution was also suggested. The suggested algorithm was compared with the results of a tabu search and sweeping method by Taillard and Lee, respectively. The suggested algorithm gives better solutions rather than existing algorithms.

Keyword: heterogeneous VRP, genetic algorithm, fixed and variable costs

1. 서론

2003년 기능별 국가물류비 추이를 살펴보면 수송비, 포장비는 전년대비 증가하였으나 재고유지비, 하역비, 물류정보비 및 일반관리비는 감소하였다. 수송비는 꾸준히 증가하는 반면 재고유지관리비는 감소하여 국가물류비 중 수송비가 차지하는 비중은 지속적으로 증가하고 있는 실정이다(Jo and Sim, 2006).

이러한 수송비의 급격한 증가는 물동량의 증가, 유가 및 인건비의 상승, 화물차량의 증가, 해상운임 상승 등의 복합적인 원인으로 분석되었다(Seu and Han, 2005). 따라서 차량경로문제에 있어서 단순한 최소 거리(시간)문제보다는 차량유지비 및 인건비 등의 변동비와 고정비를 종합적으로 고려할 필요가 있다. 전국이 일일 생활권으로 묶여 있고 잘 발달된 도로망 덕분

에 위의 수송비 절감을 위해서는 단순한 최소거리(시간) 단축보다는 전체 수송운행비용을 절감할 수 있는 차량경로 문제(Vehicle Routing Problem)를 구축하여야 한다.

본 연구에서는 차량경로문제의 여러 가지 변형 중 다수 · 다종 차량을 가지고 차량 종류별로 각기 다른 운영비용(고정비, 변동비)이 발생한다는 가정하에 최소운행비용 경로를 구성하고 더불어 이에 맞는 최적의 차량 조합을 구하는 유전 알고리즘을 제시하여 수송 정책 수립을 위한 의사결정 자료를 제공하는데 목적이 있다.

2. 기존연구 검토

HVRP(Heterogeneous fleet VRP)는 차량경로문제의 이동거리 최

*연락처 : 전진욱 교수, 122-875 서울시 은평구 수색동 205번지 국방대학교 운영분석과, Fax : 02-309-6233, E-mail : gwjeon@kndu.ac.kr
2007년 01월 접수, 2회 수정 후 2007년 05월 게재확정.

소화의 목적보다는 고정비, 변동비 등의 실제 운영비용의 최소화를 목적으로 하는 문제로서 VFM(Vehicle Fleet Mix)라고도 한다(Golden *et al.*, 1984). HVRP의 기본적인 개념은 각기 다른 용량을 가진 차량들이 서로 다른 운영비용(고정비, 변동비)이 발생한다는 가정하에 총 운행비용을 최소로 하는 최적의 차량 조합을 구하는 것이다.

HVRP의 시초로 Golden *et al.*(1984)은 수요지를 모두 연결시켜 거대한 경로를 형성한 후 이를 다시 여러 개의 경로로 나누어 Giant tour와 3-OPT를 이용하여 차량의 고정비(fixed cost)를 최소화하는 방법을 제시하였다. Gheysens *et al.*(1984)은 Golden *et al.*이 구한 low bound에 의해서 정해진 차량의 용량과 대수를 이용하여 seed point별로 차량을 할당하는 방법을 제시하였는데, 이는 출발지(Depot)에서 가장 멀리 떨어진 지점(첫 번째의 seed point)에 가장 큰 용량의 차량을, 출발지와 첫 번째 seed point에서 멀리 떨어진 지점(두 번째 seed point)에는 두 번째로 큰 용량의 차량을, 나머지는 선정된 seed point들에 준비된 차량을 할당하는 방법이다. 경로가 모두 형성된 후에는 각 경로별로 외판원 순환문제(Traveling Salesman Problem)를 적용하여 경로의 이동거리를 최소화하였다. Desrochers and Verhoog(1991)는 기존의 Saving 기법을 응용하여 두 지점을 하나의 경로로 구성하여 절약되는 거리 대신 두 경로를 하나로 구성할 때 절약되는 거리와 비용을 고려하여 문제를 해결하였다. Salhi *et al.* (1992)과 Salhi and Rand(1993)은 동일한 용량의 차량으로 Clarke and Wright의 Saving(1964)기법을 응용하여 초기해를 구한 후 각 경로별로 포함하고 있는 지점을 제거, 경로 합침, 경로분할, 지점교환의 과정을 차례로 거치는 과정을 반복하여 최종해를 구하는 방법을 제시하였다. 최근 Choi and Tcha(2007)는 고정 및 변동비용을 고려한 시간제약 차량경로문제를 제시하였는데, 시간제약 정수계획모형을 수립하여 column generation(CG) 기법을 이용하여 해를 산출하였다.

Lee(2004)는 첫 단계에서 sweeping기법(Gillet and Miller, 1974; Renaud and Boctor, 2002)을 변형시킨 알고리즘을 이용하여 복수용량의 차량에 대한 차량 경로할당 및 초기해를 구하고, 두 번째 단계에서는 k-opt 알고리즘을 이용하여 1단계에서 구한 초기해를 개선하여 차량경로의 최종해를 구하는 2단계 절차를 제시하였다.

Taillard(1996)는 타부서치(Wassan and Osman, 2002)의 AMP (Adaptive Memory Procedure, Glover, 1997)를 이용하여 차량용량별로 초기해를 구하고 그 해들 중에서 여러 개의 우수한 경로를 선별하여 메모리에 저장시킨 뒤 그들의 조합을 이용하여 비용을 최소로 하는 해집합의 차량경로를 구성하는 방법을 제안하였다.

Ochi *et al.*(1998)는 섬모델에 기초한 병렬유전알고리즘을 이용하여 프로세서별로 각기 해 탐색을 진행하면서 주기적으로 이웃섬과 유전자를 교환하고 돌연변이를 거치는 진화과정을 통하여 Taillard의 해와 질적인 측면에서 동등한 결과를 보였다.

Gendreau *et al.*(1999)는 TSP를 위해 고안된 GENIUS 삽입기법

을 기반으로 타부서치를 적용하였는데 랜덤하게 고객들을 경로간에 이동시킨 후 경로 내 지점방문순서를 GENIUS 삽입기법을 이용하여 개선시키는 절차를 반복수행하여 Taillard보다 우수한 해를 도출하였다.

Kim and Lee(2001)은 타부서치를 이용하여 이동거리와 배달량을 목적함수에 동시에 고려하여 변동비와 고정비의 목적식 가중치에 따라 다양한 결과값을 도출하였으며, No and Ha (2001)는 유전자 알고리즘을 이용하여 수요지점의 데이터를 동적으로 랜덤하게 발생시켜 서비스 시간대와 차량별 대수를 구하였다. 여기서 사용되는 유전자 알고리즘은 분산탐색(scatter search)과 경로 재구성(petal decomposition)방법을 이용하여 차량의 용량과 서비스 시간 조건에 맞게 유전자를 배열하여 초기해를 구한 후 유전자 인접인자 재결합 교차를 이용하여 해를 진화시키면서 차량의 고정비가 가장 작은 최적해를 탐색하였다.

HVRP는 목적함수의 설정에 따라 여러 가지 형태로 구분되며 그 종류 및 목적함수는 <Table 1>과 같다.

Table 1. Objective functions for HVRP

	Writer	Fitness Function	Methods
VFSMP	Golden <i>et al.</i> (1984)	$\sum \text{Distance} + \sum \text{Fixed Cost}$	Giant-tour 3-opt
VFM	Salhi <i>et al.</i> (1992)	$\sum \text{Distance} + \sum \text{Fixed Cost}$	saving method
VFMVRC	Salhi <i>et al.</i> (1992)	$\sum (\text{Distance} \times \text{Variable Cost})$	saving method
Vehicle Fleet Composition Problem	Salhi and Rand (1993)	$\sum (\text{Distance} \times \text{Variable Cost})$	saving method
VRPHE	Taillard (1996)	$\sum (\text{Distance} \times \text{Variable Cost})$	tabu search (AMP)
HVRP	Gendreau <i>et al.</i> (1999)	$\sum \text{Distance} + \sum \text{Fixed Cost}$ $\sum (\text{Distance} \times \text{Variable Cost})$	tabu search (Genius inserting method)
HVRPD	Kim and Lee (2001)	$\alpha[\sum (\text{Distance} \times \text{Variable Cost})] + (1-\alpha)[\sum (\text{Demand} \times \text{Weighted Cost})]$	tabu search
HVRPCW	Lee (2004)	$\{\sum (\text{Distance}) + \sum (\text{Fixed Cost})\}$	sweeping method
HVRP	Suggested Algorithm (2006)	$\alpha[\sum (\text{Distance} \times \text{Variable Cost}) + \sum (\text{Fixed Cost})] + \beta[\sum \text{Distance}]$	genetic algorithm

<Table 1>에서 Taillard(1996)의 VRPHE는 목적함수에 있어 VFMVRC와 동일하지만 차량용량별 대수가 제한되어 있다는 점에서 차량용량별 대수가 무제한인 VFMVRC(Salhi *et al.*, 1992)

와는 다르다. 또 Gendreau *et al.*(1999)의 HVRP는 기존의 두가지 목적함수에 대해서 각각 따로 실험을 한 경우이며, Kim and Lee (2001)의 연구는 각 차량의 고정비를 용량으로 나눈 값으로 환산하여 무게비용을 산출하여 변동비와 고정비의 비율에 따라 목적함수 값을 각각 산출하였다.

Lec(2004)의 연구에서 고정비는 운행되는 차량의 수만큼 비용이 증가하고 변동비는 동일하게 적용하여 목적식을 수립하였다.

본 연구는 운행비용을 거리에 따른 변동비와 차량 종류에 따른 고정비를 동시에 고려하였으며 목적함수식에 운행거리를 변동가중치를 적용하여 해의 개선이 이루어지지 않을 경우 운행거리에 가중치를 점차적으로 증가시켜 해의 개선이 이루어지도록 하였으며, 이때 운행거리에 가중치를 부여하지 않으므로 최초의 목적함수식으로 복귀하도록 하였다.

3. 수리모형의 구축

3.1 모형의 개요 및 가정

본 연구에서 구성하고자 하는 차량경로문제의 모형은 전체 수요지점상에 N개의 수요지가 있고 이 수요지점들의 수요량을 충족시킬 수 있는 충분한 차량적재용량과 차량대수를 보유하고 있다는 가정 하에 모든 수요지의 수요량을 충족시킬 수 있는 유일한 공급지인 단일창고를 중심으로 모형을 구축하였다.

각 수요지점의 수요량과 위치는 알려져 있으며 차량이 방문하는 수요지점 수요량의 합은 차량의 용량을 초과할 수 없다. 이때 모든 수요지점은 한대의 차량에 의해서 한번만 방문하고 운행되는 차량의 총 운행비용은 차량의 고정비와 운행거리에 따른 변동비의 합이 최소가 되도록 한다. 여기서 고정비는 차량이 운행됨에 따라 이동거리에 관계없이 추가되는 비용으로 운전자 임금, 차량 노후에 따른 감가상각비 등이 포함되고 변동비는 운행차량에 대하여 이동거리에 따라 비용이 증가하는 것으로 연료비, 고속도로 사용비 등이 포함된다.

본 연구는 기존의 HVRP의 틀에서 벗어나지 않는 범위 내에서 변동비 적용에 대한 새로운 접근방식과 이에 따른 변동비의 개념을 목적함수에 반영한 것으로 수리모형 구축을 위한 가정사항은 다음과 같다.

- 첫째, 차량의 출발 및 종착은 Depot에서만 이루어지고 단일 창고만 존재한다.
- 둘째, 차종별 운전자의 운전가능 여부는 동종 차종으로 제한한다.
- 셋째, 차량운행에 따른 총 운행비용은 고정비와 변동비의 합으로 계산하고 고정비는 운전자임금, 변동비는 차종별 차량 연비로 제한한다.
- 넷째, 각 차량경로에 포함된 수요지점 수요량의 합은 최대

적재용량을 초과할 수 없다.

다섯째, 차량의 적재용량은 종류별로 다르며 제한된 차량을 보유하지만 총 수요량보다 충분히 많은 차량을 보유한다.

3.2 용어 정의 및 모형구성

- n : 수요지 수 ($n=1, \dots, N$)
- i, j : 수요지 ($i=1, \dots, n; j=1, \dots, n; i=j=0$: 공급지)
- D_i : 수요지점 i 의 수요량
- Y_{ij} : 지점 i 에서 j 로의 운송량
- Q_k : 차량 k 의 적재용량
- f_k : 차량 k 의 고정비
- g_k : 차량 k 의 변동비
- d_{ij} : 수요지 i 와 j 간 이동거리
- q_j : 지점 j 의 수요량(배달량)
- α : 운행비용 변동가중치
- β : 운행거리 변동가중치
- $X_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{수요지점 } i \text{에서 } j \text{까지 } k \text{번째 차량이 운행되면} \\ 0, & \text{그렇지 않으면} \end{cases}$

본 연구에서 제시하는 목적식 및 제약식은 다음과 같다.

$$\text{Min } \alpha \left\{ \sum_{k=1}^K \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N (d_{ij} g_k) X_{ijk} \right\} + \left\{ \sum_{k=1}^K f_k \sum_{j=1}^N X_{0jk} \right\} + \beta \left\{ \sum_{k=1}^K \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N d_{ij} X_{ijk} \right\} \quad (1)$$

subject to

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=0}^N X_{ijk} = 1, \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=0}^N X_{ijk} = 1, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

$$\sum_{a=0}^N X_{abk} - \sum_{c=0}^N X_{cbk} = 0, \quad a = 0, 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

$$b = 0, 1, 2, \dots, N \quad c = 0, 1, 2, \dots, N \quad k = 1, 2, \dots, K$$

$$\sum_{i=0}^N Y_{ij} - \sum_{l=0}^N Y_{jl} = q_j, \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^N Y_{i0} = 0 \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^N Y_{0j} = \sum_{i=1}^N q_i \quad (7)$$

$$Y_{ij} \leq \sum_{k=1}^K X_{ijk} Q_k, \quad i \neq j = 0, 1, \dots, N \quad (8)$$

$$X_{ijk} \in \{0, 1\}, \quad Y_{ij} \geq 0, Y_{ii} = 0, \quad i = 0, \dots, N \quad j = 0, \dots, N \quad k = 1, \dots, K \quad (9)$$

N 은 지점수(고객수), “0”은 출발지(Depot), k 는 차량의 종류, d_{ij} 는 두 지점간의 거리, f_k 는 차량 k 의 고정비, Q_k 는 차량 k 의 용량, q_i 는 지점 i 의 수요량(배달량)을 각각 의미한다. 결정변수 X_{ijk} 는 차량타입 k 로 지점 i, j 를 이동했을때는 1, 그렇지 않으면 0을 나타내며, Y_{ij} 는 지점 i 에서 j 로의 운송량을 나타낸다.

식 (1)은 목적함수로서 차량의 운행비용과 차량의 운행거리를 나타낸다. 식 (2)와 식 (3)은 각 수요지에는 한 대의 차량만이 방문할 수 있다는 일회방문의 제약을 의미한다. 식 (4)는 차량이 임의의 수요지점에 도착하면 화물의 하역을 마친 후에 반드시 다른 수요지점이나 단일창고로 출발해야 한다는 차량흐름의 연속성을 나타내는 제약이다. 식 (5)는 각 고객에 고객이 요구한 배달량 만큼만 배달한다는 것을 의미하고 식 (6)은 출발지(Depot)에는 반드시 빈차로 귀환함을 의미하며 식 (7)은 출발지에서 싣고 떠나는 총 배달량은 고객들의 총 수요량과 일치함을 의미한다. 식 (8)은 두 지점사이에 이동되는 운송량은 그 경로에 사용되는 차량의 최대용량을 초과할 수 없다는 것을 의미한다.

4. HVRP 유전자 알고리즘

4.1 유전자 표현

본 연구는 다용량 차량 경로문제로서 유전자 표현은 2개의 string으로 이루어진 이중구조로 설정하였다. 이는 차량의 특성에 따른 수요지점의 경로를 반영하여 차량의 종류와 적재용량을 표현할 수 있으며 다음 <Table 2>와 같다.

Table 2. Gene Representation

Customer	1	2	3	4	5	6
Priority	3	5	1	6	2	4
Car Number	2	1	3	3	2	1

<Table 2>에서 Customer는 수요지점의 번호를 나타내지만 불필요한 부분으로 실제 구성은 하지 않는다. Priority는 각 수요지의 방문 우선순위를 표현하고 Car Number은 각 수요지의 방문차량을 나타내는 것으로 유전자에서 표현된 개체는 차량 번호를 의미한다. 위의 2번 차량의 경우는 차량 경로가 D (Depot)-1-5-D 인데 방문 우선순위를 고려한다면 D-5-1-D인 경로를 구성하게 된다. 위와 같은 각 수요지의 각 차량을 할당하는 경우 할당된 노드의 수요량은 차량 용량을 초과할 수 없다는 제약을 만족해야 하는데, 이는 Customer를 생성 후 Car Number을 랜덤 생성 할당하는 방식을 사용하여 초기해에서 생성 실행 불가능해가 생성 시 다음과 같은 과정을 통하여 해의 탐색을 유도하였다.

4.2 초기해 생성 및 개선

임의 생성된 초기 해를 바탕으로 각 차량에 대한 수요지로의 배달량을 만족하도록 초기 해를 개선하여 실행 불가능해를 제거하였으며 차량을 할당 한 후 차량 교환을 실시하여 초기 해가 우수한 해를 갖게 함으로써 최적해에 가까운 우수한 해를 연산 초기에 찾을 수 있도록 하였다.

4.3 적합도 함수

본 연구의 목적함수인 총 운행비용 최소화를 위해 적합도는 총 운행비용의 합의 역수로 다음 식 (1)과 같다.

$$fitness = \frac{1}{\alpha \sum Total Cost + \beta \sum Total Distance} \quad (1)$$

적합도 함수의 분모는 각 차량 경로의 운행비용의 합과 총 운행거리의 합의 역수를 취함으로써 운행비용과 운행거리의 합이 적을수록 높은 적합도 값이 나타나게 된다. 그러나 위식에서 비용가중치 α 와 거리 가중치 β 의 값을 해의 개선을 위한 세대수 진행에 대해 가중치 비율을 달리 적용하여 목적식을 수립하였다. 본 연구에 적용된 변동가중치는 다음 <Table 3>과 같다.

Table 3. Weighted Values

Number of generation (not improving solution)	weighted value on cost α	weighted value on distance β
1~50	1	0
51~	0.75	0.25
151~	0.5	0.5
301~	0.25	0.75
450~	0	1

해의 개선이 이루어지지 않을 경우 이를 탈출하기 위하여 운행거리 목적식의 비중을 일시적으로 높임으로서 전체 운행비용이 높아지더라도 지역해의 탈출을 돕고 해의 개선이 이루어지면 곧바로 처음 목적식의 가중치로 복귀하는 변동가중치를 목적식에 적용하였다.

4.4 선별 및 재생산

본 연구에서는 선별의 여러 가지 방법 중 Roulette Wheel 방법을 채택하였으며 예시된 집단에서 재생산 연산이 수행된 구체적인 결과는 다음 <Table 4>와 같다. 선택확률이 높은 2번 염색체는 2번 선택되었고, 1번과 3번 염색체는 각각 1번씩 선택되었다. 4번 염색체는 확률적으로 선택되지 못하고 소멸되었

음을 알 수 있다.

Table 4. Roulette Wheel

i	genes	fitness value	selection probability	i+1	genes
1	21463355	9.8	18.0	1	65234153
2	65234153	24.5	45.0	2	52316243
3	52316243	16.9	31.0	3	65234153
4	23234261	3.2	6.0	4	21463355
합 계		54.4	100.0		

4.5 엘리트 보존 전략

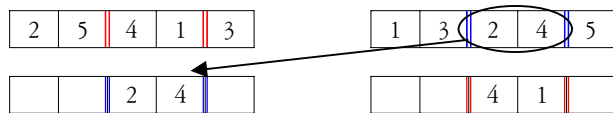
엘리트 보존 전략은 집단 내에서 가장 강한 개체가 다음 세대로 변경되지 않고 전달되는 것을 보장하기 위한 것이며 만약 이전 세대의 최적 개체를 저장하고 있다가 일련의 모의진화가 수행된 후 현 세대에서 좀 더 나은 개체가 발생되면 최적 개체를 교환하게 된다. 이 방법으로 유전알고리즘의 성능을 향상시키고 선택 재생산과정의 단점을 보완한다.

4.6 교차

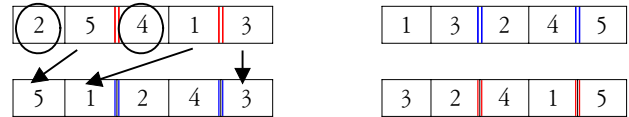
순서교차는 수요지점의 중복 없이 항상 실행 가능해를 유지시켜주며 부모해들의 상대적인 순서를 보존하여 주는 성질을 가지고 있으므로 차량의 방문순서는 순서교차를, 각 수요지에 할당된 차량은 이점교차를 각각 적용하였다.

순서교차 단계는 다음과 같다.

- 단계 1 : 각각의 개체들에게 난수를 발생시켜 교차율과 비교하여 개체별로 교차대상자를 선정한다.
- 단계 2 : 교차대상자로 선정된 개체들에 대하여 짝을 지워준다.
- 단계 3 : 짝지어진 개체들에 대하여 2개의 절단점을 무작위로 선정 후, 절단점내의 유전인자를 상대방 개체에게 상속한다.

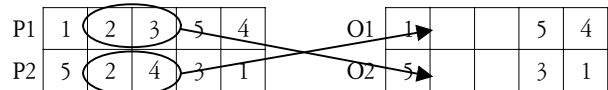


단계 4 : 방문우선순위의 빈칸에는 두 번째 절단점 이후부터 부모의 유전인자를 차례대로 나열 후 상대방 개체로부터 상속된 유전인자는 제거하고, 상속되지 않은 유전자를 두 번째 절단점 이후부터 순서대로 채워 넣는다(좌측 개체에서 두 번째 절단점 이후부터 인자를 나열하면, 3-2-5-4-1이 되며 여기에 상대방으로부터 상속된 2와 4를 제거하면 3-5-1이 남게되고, 남은 인자를 두 번째 절단점부터 채우면, 5-1-2-4-3이 된다).



※ 우측개체도 같은 방법으로 교차 실시

- 방문차량은 이점교차를 실시하는데 절차는 다음과 같다.
- 단계 1 : 선택된 두 부모해에서 교차율에 의해 교차의 실시 여부를 결정한다.
- 단계 2 : 임의의 두 절단점을 선정하여 처음, 중간, 끝의 3부분으로 구분한다.



단계 3 : O1은 P1에서 처음과 끝부분을 상속받고, P2에서 중간부분을 상속받는다.



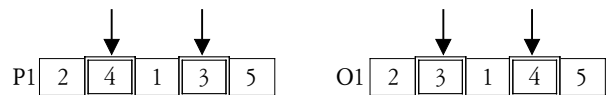
교차에 의한 연산 적용시 실행불가능해가 발생하는 경우가 있으나 이는 해 개선과정을 거쳐 자동 소멸된다.

4.7 돌연변이

차량방문 순서는 순열표현으로 돌연변이에 의해 중복되는 유전자가 발생하면 실행불가능해가 된다. 그러므로 돌연변이를 통해 중복되는 유전자가 발생하지 않도록 교환을 적용하였고, 수요지 방문차량의 경우는 각 수요지에 차량을 할당하는 개념이므로 같은 차량이 할당되어도 무방하여 점 돌연변이를 사용하였다.

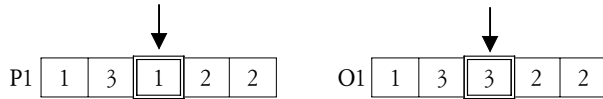
교환의 절차는 다음과 같다.

- 단계 1 : 돌연변이 확률에 의해 실시 여부를 결정 후, 임의의 두 개체를 선택한다.
- 단계 2 : 두 개체를 서로 교환한다.



점 돌연변이 절차는 다음과 같다.

- 단계 1 : 돌연변이 확률에 의해 실시 여부를 결정 후, 임의의 한 개체를 선택한다.
- 단계 2 : 선택된 개체의 위치에서 차량의 수 사이의 난수를 발생시켜 선택된 개체를 변경한다.



돌연변이율은 최초에는 0.02로 설정하였으며, 50세대가 진행되어도 해의 개선이 없다면 변동돌연변이가 1단계를 적용하여 돌연변이율을 0.05까지 상승시킨다. 해의 개선이 이루어지면 다시 0.02로 돌연변이율이 조정되며 변동돌연변이를 적용한 후에 100세대가 진행되었는데 해의 개선이 없으면 단계적으로 돌연변이율을 0.1 → 0.3 → 0.5까지 상승시켜 해의 개선을 유도한다.

4.8 유전 파라미터

반복 실험을 통하여 알고리즘과 문제의 특성에 적합한 파라미터를 본 연구에 적용하였으며 적용한 유전 파라미터는 다음 <Table 5>와 같다.

Table 5. Genetic Parameters

	popsize	Pc	Pm	number of generations	Flexible fitness value
value	10	0.8	0.02~0.5	1000~3000	0~1

5. 수리모형 검증 및 알고리즘 결과분석

본 수리모형의 검증을 위하여 ILOG CPLEX와 연구에서 제시한 유전알고리즘을 이용하여 수요지 5개, 차량 4대로 구성된 경로의 운행비용을 산출하였다. 다음 수리모형 검증 결과는 다음 <Table 6>과 같다.

Table 6. Validation of Mathematical Model

	ILOG CPLEX	Genetic Algorithm
Result of Cost	407.63	407.63
Run Time(sec)	2.42	1.21

실험결과 동일한 결과 값을 얻음으로 본 연구에서 제시한 수리모형을 검증하였다. ILOG CPLEX(8.0) 사용 시 수요지수가 5개로 비교적 빠른 시간에 결과를 얻을 수 있었으나 수요지수를 20개로 증가시켜 연산시간을 비교해 본 결과 유전알고리즘과 비교 시 연산시간이 과다 소요되는 것을 알 수 있다. 수요지 20개로 확대 적용한 결과는 다음 <Table 7>과 같다.

<Table 7>에서 알 수 있듯이 ILOG CPLEX의 연산시간 증가는 수요지수 증가에 따라 유전알고리즘과 비교 시 높은 수치를 나타내었으며, ILOG CPLEX보다 유전알고리즘이 다수의 수요지와 차량의 조건하에서 최적에 가까운 경로를 구성하는

Table 7. Comparison of the ILOG CPLEX and Genetic Algorithm

	ILOG CPLEX (8.0)	Genetic Algorithm	
Result of Cost	613.92	615.78	Demand Points : 20 # of car : 4
Run Time (sec)	24180 (6h 43m)	273.21	

데 효율적인 방법임을 입증하였다.

본 연구에서는 변동비를 동일하게 적용하여 운행거리와 고정비의 합을 최소화시킨 Taillard(Taillard, 1996)의 3번 예제를 사례 1으로, 이정만(Lee, 2004)의 예제를 사례 2로 각각 선정하여 본 연구에서 제시하는 알고리즘과 비교하였다. 본 실험예제에 적용한 변동비 및 고정비는 다음 <Table 8>과 같다.

Table 8. Fixed and Variable Costs

Vehicles(Capacity)	A(20)	B(30)	C(40)	D(70)	E(120)
Fixed Cost(f_{cost})	20	35	50	120	225
Variable Cost (g_{cost})	1.0	1.3	1.9	2.4	2.9

화물운송회사 보유대수는 차량종류별 2대씩 총 10대이고 수요지 수는 20개이다. 실험결과는 다음 <Table 9>와 같다.

Table 9. Results of the Existing Problems and This Study

	car	Vehicle routes	loading amounts	Distance	
Case 1	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	118	91.65	
	E	D-3-20-2-16-9-10-15-17-D	118	125.47	
	(f_{cost})	590	Dist	371.02	Total Cost (1426.29)
(g_{cost})	836.29	Run Time (sec)	164		
Case 2	E	D-11-16-2-20-3-1-D	115	83.54	
	E	D-8-7-6-14-18-D	119	87.90	
	E	D-12-4-13-19-17-15-5-10-9-D	120	138.22	
	(f_{cost})	675	Dist	309.66	Total Cost (1573.01)
	(g_{cost})	898.01	Run Time (sec)	0.42	
This Study (2006)	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	
	(f_{cost})	675	Dist	388.03	Total Cost (1318.03)
(g_{cost})	643.03	Run Time (sec)	2652		

D: Depot

실험결과 본 연구가 기존의 다른 연구보다 변동비 측면과 차량조합에 있어 좀더 발전적인 모습을 보였으나 다만 연산시간이 다른 연구에 비해 많이 소요되었는데 case 2의 경우는 차량을 미리 선정해 놓은 상태에서 알고리즘을 수행하여 본 연구와 차이가 나는 것이며 본 연구는 유전 알고리즘 특성상 다수의 모집단을 대상으로 선별과정을 거치므로 다소 기존연구보다 연산시간이 늘어나는 결과를 나타내었다. <Figure 1> ~ <Figure 3>는 사례 1 및 사례 2와 본 연구의 최종해 차량경로를 구성한 그림이다.

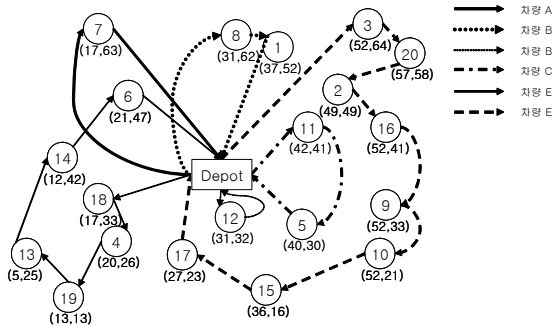


Figure 1. Vehicle Routes (Case 1)

사례 1의 최종해 차량구성에서 알 수 있듯이 용량이 큰 차량 E 2대가 전체 20개의 수요지중 14개 수요지의 수요량을 충족시키는 차량 경로를 구성하였으며 차량 용량이 큰 차량 E(2대)가 대부분의 수요지를 충족시키면서 경로를 구성하여 변동비 측면에서는 좀 더 나은 경로 구성이 필요한 모습을 보여주고 있다.

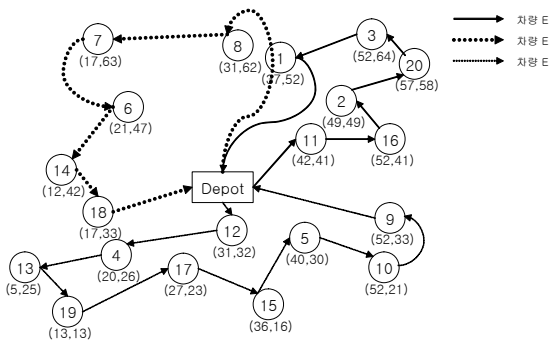


Figure 2. Vehicle Routes(Case 2)

사례 2는 차량 용량이 가장 큰 차량 E(3대)로 차량 경로를 구성하여 고정비와 변동비 측면에서 차량 용량이 큰 차량으로만 경로가 구성되어 전체적인 운행비용은 늘어날 수밖에 없는 결과를 보여주고 있다.

다음 <Figure 3>는 본 연구의 최종해의 차량 경로 구성이며 변동비를 고려하여 차량을 선정하므로 차량 조합에 용량이 큰 차량과 작은 차량이 적절히 편성된 것을 보여준다.

<Figure 4>에서 고정비는 사례 2와 같은 값(675)을 나타내지만 변동비의 경우에는 두 연구보다 월등히 작은 것을 알 수 있다. 이는 본 연구가 고정비 값이 다른 연구보다 높더라도 변동비를 줄이는 차량조합과 경로구성을 이에 따른 경로구성을 한 것을 보여준다.

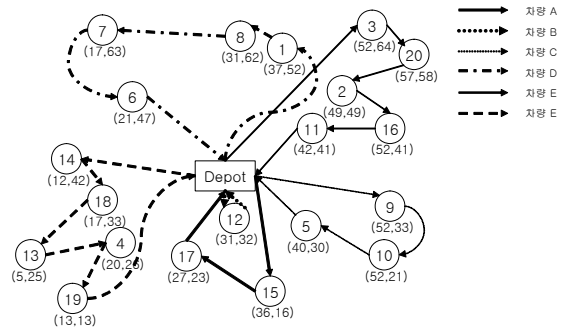


Figure 3. Vehicle Routes(Suggested Algorithm)

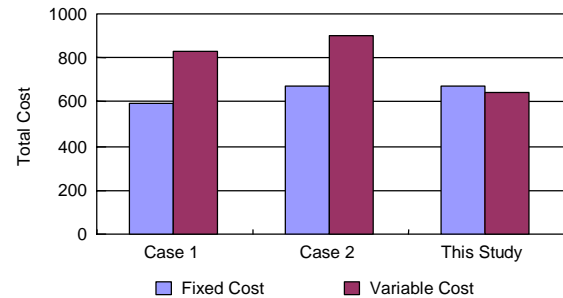


Figure 4. Comparison of the Fixed and Variable Costs

각 연구별 전체 차량 적재율은 <Table 10>과 같다.

Table 10. Proportion of loading amounts(rate)

Case 1	Case 2	This Study
98%	98.3%	86.8%

위 <Table 10>에서 알 수 있듯이 본 연구의 전체 차량 적재율이 가장 낮은 수치를 보이고 있으나, 이는 차량 A의 적재율이 65%로 낮아 전체적인 적재율이 감소되었으나 다른 차량의 경우에는 대부분이 90~96%의 좋은 적재율을 보여주고 있는 것을 <Table 11>에서 알 수 있다.

위에서 본 연구의 A차량과 같이 적재율이 낮은 이유로 알고리즘상의 문제가 있다고 볼 수는 없다. 그 이유는 수요지 20개의 제한된 수요지와 제한된 차량을 가지고 알고리즘을 수행하였기 때문이며, 수요지 수와 차량 대수를 증가시킬 경우 전체적인 차량 적재율은 본 연구의 적재율을 다음과 같이 분석하였다. 수요지 50개의 Taillard 13번 예제의 데이터를 이용하여 본 연구의 알고리즘 측면에서 비교한 결과는 다음 <Table 12>와 같다.

Table 11. Proportion of the loading amounts/loading capacity

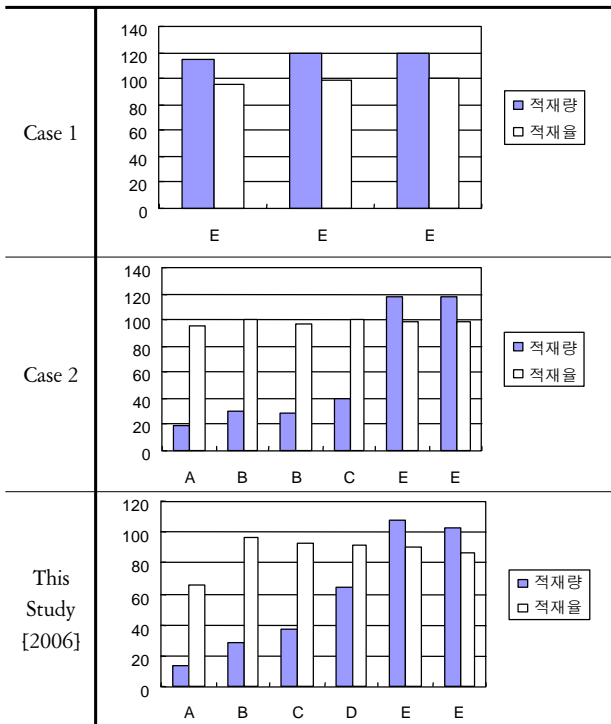
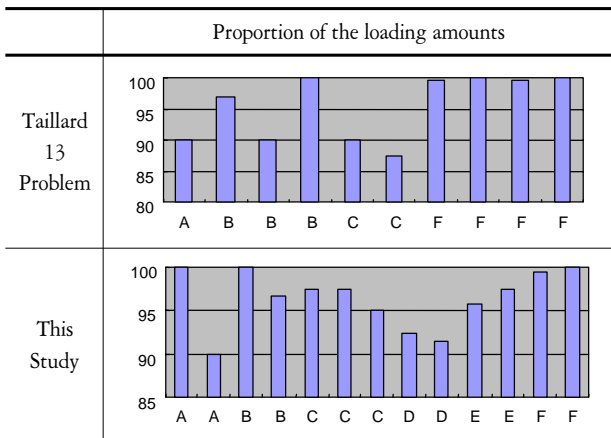


Table 12. Comparison of the large scale Problem



Taillard의 13번예제의 전체 차량 적재율은 95.26%이며 본 연구 알고리즘을 사용한 결과 값은 96.4%를 나타내었다. 이는 본 연구의 알고리즘이 적재율 측면에서 좋은 결과를 산출해 낼 수 있으며 알고리즘 구성 측면에서도 문제가 없음을 보여주고 있다. <Figure 5>는 운행(거리, 비용) 결과이며 운행비용은 그래프 상에서 알 수 있듯이 초기 100세대까지 급격히 운행비용이 줄어들고 이후 점차 해의 개선을 이루는 모습을 보이고 있다. 이는 초기해 모집단의 해의 개선과정이 차량용량의 제한 및 차량교환을 통하여 잘 이루어지고 있는 것을 의미하며 100세대 이후로 지역 해의 탈출을 돕기 위하여 변동가중치 및 변동동연변이에 의해 지역해를 탈출하여 해의 개선이 이루어졌음을 의미한다. 또한 전체적으로 알고리즘이 운행거리를 감

소시키면서 진행되었지만 해의 개선과정에서 운행비용을 낮추기 위하여 다소 운행거리가 늘어나는 모습을 보이는데, 이는 차량의 조합이 바뀌면서 차량경로를 새롭게 구성하여 운행거리를 낮춤과 동시에 운행비용까지 줄인 것을 의미한다.

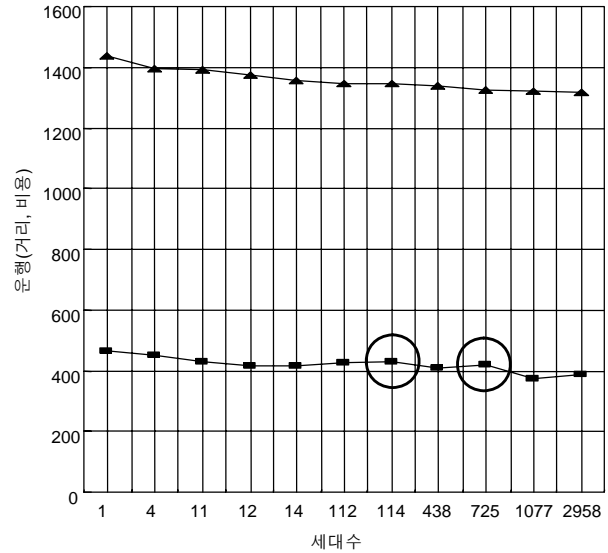


Figure 5. Total Cost and Distance

초기 100세대까지는 운행비용과 같이 감소하는 경향을 보이지만 해의 개선이 잘 이루어지지 않는 100세대 이후 목적식에 운행거리 가중치를 증가시키면서 지역해에서 탈출하도록 하였다. 최종 연산결과 10대의 차량 중 2, 3, 6, 8번 차량은 배달량이 없어 경로 구성에서 삭제되었다.

6. 결론

지금까지의 대부분의 HVRP 문제는 차량종류별 고정비에 운행거리를 더하여 계산하였다. 따라서 차량종류별 고정비 값이 정해져 있으므로 운행거리를 줄이는 알고리즘을 구축해야만 했고 이에 운행비용에 변동비 요소를 고려하다 보면 기존의 경로 구성과는 다른 차량 경로가 형성되며 차량의 종류도 용량이 큰 차량과 작은 차량이 적절히 편성되어 전체적인 운행비용을 최소화 시킬 수 있는 차량조합을 유도할 수 있었다. 본 연구는 운행거리 측면에서 기존 연구보다 다소 거리가 늘어날 수 있지만 차량별 운행거리 및 운행시간에 제한이 없는 것을 가정하여 문제를 구성하였다. 하지만 기존 연구보다 운행거리(시간)가 크게 늘어나지 않았으며 이는 알고리즘 구축 시 운행 거리에 따른 변동비 요소가 작용하였기 때문이며 이와같이 고정비와 변동비의 상호작용에 따라 문제에서 요구하는 운행거리 및 운행비용 결과를 산출 할 수 있었다.

본 연구는 효율적인 해의 탐색을 위해 초기해 개선을 실시하여 초기해에 우수한 해가 포함되도록 하여 초기해의 개선속

도를 증가시켰다. 또한 변동돌연변이와 목적식에 변동가중치를 적용하여 지역해 탈출을 시도하였으며, 변동가중치의 경우 해의 개선이 이루어 지지 않는 세대수에 따라 운행거리 목적식 가중치를 증가시켜 운행거리 측면에서도 만족할 수 있는 결과를 산출하였다. 결과적으로 본 연구가 HVRP 기존연구에 비해 다른 점과 발전시킨 사항은 운행비용 요소에 변동비 요소를 동시에 고려하여 적절한 차량조합과 근사최적에 가까운 운행비용을 산출하였으며, 새로운 목적식을 정의하여 문제를 구성하였고 이에 대한 알고리즘의 효율성을 입증하였다.

참고문헌

Choi, E and Tcha, D. (2007), A column generation approach to the heterogeneous fleet vehicle routing problem, *Computer & Operation research*, 34, 2080-2095.

Clark, G. and Wright, J. (1964), Scheduling of vehicle from a Central Depot to a Number of Delivery Points, *Operations Research*, 12, 568-581.

Desrochers, M. and Verhoog, J. W. (1991), A new heuristic for the fleet size and mix vehicle routing problem, *Computers and Operations Research*, 18, 263-274.

Gendreau, M., Laporte, G., Musaraganyi, C., and Taillard, E. D. (1999), A Tabu Search Heuristic for the Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem, *Computer & Operation Research*, 26, 1153-1173.

Gheysens F. G., B., Golden B. L., and Assad A. (1984), A comparison of techniques for solving the fleet size and mix vehicle routing problem, *Operation Research Spektrum*, 6, 207-216.

Gillet, B. and Miller, L. (1974), A Heuristic Algorithm for the vehicle Dispatching Problem, *Operation Research*, 22, 340-349.

Glover, F. (1997), Tabu search and Adaptive Memory Problem programming: Advances, Applications and Challenges, *Interfaces in Comp.*

Sc. and Oper. Res., 1-76.

Golden, B., Assad, A., Levy, L., and Gheysen, F. G. (1984), The Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem, *Computer & Operations Research*, 11, 49-66.

Jo, H. S. and Sim, J. I. (2006), 2004 Traffic Congestion Cost Analysis, *KOTI*, 137-144.

Kim, K. H. and Lee, Y. H. (2001), A Heuristic for Vehicle Routing Problem with Customer's Delivery Volume, Conference of the Korean Institute of Industrial Engineers (Spring).

Lee, J. M. (2004), Modeling and Analysis of the Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem with Customer Window, *Korea National Defence University*, Master Thesis, 15-29.

No, I. G. and Ha, Y. H. (2001), Heterogeneous Fleet and Dynamic Vehicle Routing Problem with Time Windows under E-Commerce, 2001 Conference of the Korean Institute of Industrial Engineers (Spring).

Ochi, L. S., Vianna, D. S., Drummond, J. M. A., and Victor, A. O. (1998), A parallel evolutionary algorithm for the vehicle routing problem with heterogeneous fleet, *Lecture Notes in Computer Science*, 1388, 216-224.

Renaud, J. and Boctor, F. F. (2002), A sweep-based algorithm for the fleet size and mix vehicle routing problem, *European Journal of Operational Research*, 140, 618-628.

Salhi, S., Sari, M., Saidi, D., and Touati, N. (1992), Adaptation of some vehicle fleet mix heuristics, *Omega*, 20, 653-660.

Salhi, S. and Rand, G. K. (1993), Incorporating vehicle routing into the vehicle fleet composition problem, *European Journal of Operation Research*, 66, 313-330.

Seu, S. and Han, S. Y. (2005), 2003 Transportation Cost Analysis, *KOTI*, 119-124.

Taillard, E. D. (1996), A heuristic column generation method for heterogeneous fleet, *CRT*, 3.

Wassan, N. A. and Osman, I. H. (2002), Tabu search variants for the mix fleet vehicle routing problem, *Journal of the Operational Research Society*, 53, 768-782.



임무균
 육군사관학교 학사
 국방대학교 운영분석학과 석사
 현재: 육군 25사단 수송중대장
 관심분야: 유전자 알고리즘, 최적화기법 응용



전건욱
 공군사관학교 전자공학과 학사
 고려대학교 산업공학과 석사
 University of Louisville 산업공학 박사
 현재: 국방대학교 운영분석학과 부교수
 관심분야: 최적화기법 응용, 일정계획, 신뢰도분석, 셀형 제조시스템