

■ 論 文 ■

교통상황과 확률적 수요를 고려한 차량경로문제의 Hybrid 유전자 알고리즘

A Hybrid Genetic Algorithm for Vehicle Routing Problem which Considers Traffic Situations
and Stochastic Demands

김 기 태

(국방대학교 운영분석학과 박사과정)

전 건 욱

(국방대학교 운영분석학과 교수)

목 차

- | | |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> I. 서론 II. 수리모형 구축 <ul style="list-style-type: none"> 1. 모형 개요 및 가정 2. 용어 정의 및 수리모형 구축 III. Hybrid 유전자 알고리즘 <ul style="list-style-type: none"> 1. 유전자 표현 2. 초기 모집단 3. 적합도 평가 4. 선별 | <ul style="list-style-type: none"> 5. 유전 연산자 6. 해 개선 7. 유전 파라미터 IV. 수리모형 검증 및 알고리즘 실험결과 <ul style="list-style-type: none"> 1. 실험 계획 2. 수리모형 검증 3. 알고리즘 실험결과 V. 결론 참고문헌 |
|---|--|

Key Words : 차량경로문제, 교통상황, 확률적 수요, 유전자 알고리즘, 휴리스틱
Vehicle Routing Problem, Traffic Situation, Stochastic Demand, Genetic Algorithm, Heuristic

요 약

도심지에서 수요지간의 이동시간은 복잡한 도로사정과 외부환경으로 인하여 실시간 변화하는 교통상황에 큰 영향을 받고 있으며, 수요는 시기나 성향에 따라 확률적으로 변화하고 있다. 대부분의 차량경로문제 연구는 차량경로를 선정함에 있어 수요지간의 이동거리와 평균속력, 확정된 수요를 고려하여 경로를 구성하고 있으며, 교통상황과 확률적인 수요의 동적인 외부환경 반영이 미흡하였다. 본 연구에서는 원활·지체·정체의 교통상황과 확률적인 수요를 고려한 현실적인 차량경로문제를 제안하였다. 수리모형을 구축하고, CPLEX 11.1을 이용하여 검증하였으며, 총 소요시간을 최소화하는 Hybrid 유전자 알고리즘을 제안하였다. 교통상황과 확률적 수요를 고려한 차량경로문제의 결과를 기존의 휴리스틱 알고리즘과 비교하였으며, 본 연구에서 제안한 알고리즘이 가장 우수한 해를 제공하였다.

The vehicle travel time between locations in a downtown is greatly influenced by both complex road conditions and traffic situation that changes real time according to various external variables. The customer's demands also stochastically change by time period. Most vehicle routing problems suggest a vehicle route considering travel distance, average vehicle speed, and deterministic demand; however, they do not consider the dynamic external environment, including items such as traffic conditions and stochastic demand. A realistic vehicle routing problem which considers traffic (smooth, delaying, and stagnating) and stochastic demands is suggested in this study. A mathematical programming model and hybrid genetic algorithm are suggested to minimize the total travel time. By comparing the results considering traffic and stochastic demands, the suggested algorithm gives a better solution than existing algorithms.

1. 서론

제품을 수거하거나 배달하기 위하여 차량의 경로를 계획하는 일은 교통네트워크의 매우 중요한 문제이다. 오늘날 전자상거래의 활성화로 물류 유통은 소비자 중심의 다빈도 소량운송 시대로 전환되었으며, 기업마다 처리해야 할 물량이 크게 증가하였다. 또한 도심지의 교통 상황은 차량 대수의 증가와 집회, 도로공사 등으로 점점 복잡해지고 있으며, 고객의 수요는 계절, 고객의 성향, 제품의 품질 등에 따라 확률적으로 변화하고 있다. 기업은 품질이 우수한 제품을 생산하여 고객이 원하는 시간에 배송함으로써 기업의 신뢰와 브랜드 이미지를 높이고, 매출의 성장을 위한 노력과 더불어 물류비용을 최소화하기 위한 차량경로를 계획하여 활용중이나 이들 대부분은 체계적이기 보다는 경험적 노하우를 바탕으로 하고 있다. 교통상황과 수요가 변화하는 환경에서 기존의 경험적 노하우에 의존하는 것은 물류비용을 증가시키는 중요한 요인이라 할 수 있다.

수요시간의 이동시간은 단지 거리에 의해서만 영향을 받는 것이 아니라 앞에서 언급한 바와 같이 교통상황에 큰 영향을 받는다. 이동해야 할 경로가 최단인 수요지라 하더라도 이동경로의 교통이 혼잡하다면 다른 수요지를 선정하여 이동하는 것이 소요되는 시간을 줄일 수 있다. 또한 한정된 차량의 적재능력으로 인하여 차량경로는 수요의 변화에 따라 달라질 수 있으며, 변화하는 수요를 포함하는 최적의 차량경로를 구성함으로써 물류비용을 줄일 수 있다.

Dantzig and Ramser(1959)에 의해 제기된 차량경로문제(VRP, Vehicle Routing Problem)는 차고지(Depot)에서 출발한 차량들이 서비스를 요구하는 고객들을 방문하고, 다시 차고지로 복귀하는데 소요되는 시간(거리, 비용, 차량 대수 등)을 최소화하도록 차량의 경로를 결정하는 문제이며, NP-hard 문제로 알려져 있다.

차량경로문제는 차량의 적재용량에 대한 제한이 있는 CVRP(Capacitated VRP), 수요지 방문 시간대 제약이 있는 VRPTW(VRP with Time Windows), 다회방문이 가능한 VRPMT(VRP Multi Trips), 차고지가 복수인 MDVRP(Multi Depots VRP), 차량의 용량이 서로 다른 HVRP(Heterogeneous VRP), 수요시간의 물품교환이 있는 VRPPD(VRP with Pickup and Delivery), 수거물량이 있는 VRPB(VRP with Backhauls), 확률적 상황을 고려한 SVRP(Stochastic VRP) 등의 다양한

형태로 폭넓게 연구되고 있다.

차량경로문제의 해법으로는 혼합정수계획법(MIP, Mixed Integer Programming), 분지한계법(Branch and Bound Method) 등의 최적화 해법(Exact)이 있으며, Laporte(1992)는 차량경로문제의 최적해를 구하는 알고리즘과 몇 가지 근사해를 구하는 알고리즘을 제시하였다. 최적화 해법은 수요지의 수가 증가함에 따라 많은 계산 시간이 소요되어 최적해의 산출에 상당한 제한이 따르므로, 최근에는 최적해와 근사한 값을 빠른 시간 내에 산출할 수 있는 발견적 해법(Heuristic)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. Clarke and Wright(1964)는 두 차량이 서로 다른 두 수요지를 방문하고 돌아오는 것보다 한 대의 차량이 두 수요지를 방문하고 돌아오는 경우 발생하는 거리의 절약을 이용한 Saving 알고리즘을 제안하였고, Gendreau et al.(1992)은 Insertion 기법을 적용한 후에 개선절차를 이용해 사후최적화(Post-Optimization)하는 GENIUS 기법을 제안하였으며, Goldberg and Lingle(1985)은 최초로 유전자 알고리즘(GA, Genetic Algorithm)을 순환 판매원 문제(TSP, Traveling Salesman Problem)에 적용하였다.

교통상황을 고려하여 변화하는 속력을 적용한 기존 연구로 Hill and Benton(1992)은 특정 시간에 고객이 위치한 지점에서의 평균 차량 속력을 추정하는 모형을 제시하였고, Malandraki and Daskin(1992)은 교통상황을 고려하여 2~3개의 서비스 시간대로 구분한 후 각 서비스 시간대별 차량의 평균 속력을 적용하여 총 이동시간을 추정하였는데, Nearest Neighbor Search와 Cutting Plane을 이용하였으며, 문기주·양승만(2004)은 TSP 알고리즘을 이용하였다. 김기태·전건욱(2009)은 서비스 시간대를 출근·오후·퇴근 3개의 시간대로 나누고, 각 시간대별로 교통상황을 고려하여 차량경로와 총 이동시간을 추정하는 모형을 제시하였다.

Tillman(1969)은 확률적 수요를 고려한 차량경로문제를 최초로 제시하였으며, Saving 알고리즘을 이용하여 경로를 구성하였고, Stewart and Golden(1983)은 Saving 알고리즘으로 최초 차량의 경로를 구성한 후 Lagrangian Relaxation 방법을 이용하여 재경로를 구성하는 포괄적 접근법을 제시하였다. Laporte(2002)는 Integer L-shaped 알고리즘을 기초로 한 새로운 분지 한계법을 이용하였고, Reimann(2005)은 개미 군집 최적화(ACO, Ant Colony Optimization)를 제시하였다. Bertsimas(1992)는 확률적 수요의 상한선과 하한선을 기준으로 차량경로를 구성하

고, 두 종류의 재최적화 전략(Re-Optimization Strategy)을 이용하여 차량경로의 기대거리(Expected Length)를 계산하는 휴리스틱 기법을 제시하였다. Haughton(1998)은 수요지의 수요가 0이나 특정한 양의 두 경우로 표현되는 Bernoulli Process를 제시하였고, Haughton and Stenger(1999)는 수요지의 수요가 Poisson 분포를 따르는 환경에서의 차량경로를 결정하는 모형을 제시하였으며, 모두 Saving 알고리즘과 GENIUS 기법을 이용하였다.

기존의 차량경로문제의 연구는 차량경로를 선정함에 있어 수요지의 수요와 수요지간의 이동거리 및 속력을 바탕으로 경로를 구성하고 있으며, 특히, 모든 수요지간의 차량 이동 속력을 동일하게 적용하거나 수요지의 수요가 확정된 경우를 가정하여 차량경로를 구성하고 있어 교통상황과 확률적인 수요의 반응이 미흡하였다.

본 연구에서는 교통상황을 원할·지체·정체의 3가지 상황으로 구분하고, 수요지의 수요가 확률적으로 변화하는 상황에서 제한된 차량의 적재용량을 고려하여 총 소요시간을 최소화하는 차량경로의 구성을 위한 수리모형과 Hybrid 유전자 알고리즘을 제시하였다.

II. 수리모형 구축

1. 모형 개요 및 가정

본 연구에서 다루고자 하는 문제는 3가지의 교통상황이 존재하고, 수요지의 수요가 확률적으로 변화하는 상황에서 제한된 차량의 적재용량을 고려하여 총 소요시간을 최소화하는 차량경로를 구성하는 문제이며, 이를 본 연구에서는 VRPTSSD(VRP with Traffic Situations and Stochastic Demands)로 정의한다. 여기서 총 소요시간은 차량의 이동 시간과 수요지에서의 서비스 시간을 합산한 것이다.

본 연구에서는 단일 차고지를 중심으로 전체 N 개의 수요지와 제한된 차량 대수를 보유하고 있고, 수요지별 서비스 시간과 차량의 적재용량은 일정하며, 수요지의 위치와 수요의 범위가 알려져 있는 것으로 모형을 구축하였다.

모형의 구축을 위한 가정 사항은 다음과 같다.

- 첫째, 차량의 출발과 종착은 차고지에서만 실시된다.
- 둘째, 각 수요지의 수요는 1회 방문에 의해서 만족되며, 각 수요지는 차량의 1회 방문만 허용한다.
- 셋째, 각 차량의 경로에 포함된 수요지의 수요의 합은

적재용량을 초과할 수 없다.

넷째, 각 경로별 교통상황은 알려져 있다.

다섯째, 각 수요지의 수요는 알려진 범위 내에서 임의(Random)의 확률로 결정된다.

2. 용어 정의 및 수리모형 구축

본 연구의 수리모형에서 사용되는 용어의 정의는 다음과 같다.

- n : 수요지의 수($n=0,1,2,\dots,N$)
- i, j : 수요지($i, j=0,1,2,\dots,N, i=j=0$: 차고지)
- k : 교통상황($k=1$: 원할, $k=2$: 지체, $k=3$: 정체)
- l : 차량의 수($l=1,2,\dots,L$)
- t_{ijk} : 교통상황 k 하에서 수요지 i 지점에서 j 지점에서의 이동 소요시간
- x_{ijkl} : 차량 l 이 교통상황 k 하에서 수요지 i 지점에서 j 지점에서의 운행 여부
- S_i : 수요지 i 에서의 서비스 시간
- D_i : 수요지 i 에서의 수요
- C : 차량의 적재용량
- T : 수요지들의 부분집합

본 연구의 목적함수와 제약함수로 구성된 수리모형은 다음과 같다.

$$\text{Minimize } Z = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L t_{ijk} \cdot x_{ijkl} + \sum_{i=1}^N S_i \quad (1)$$

$$\text{Subject to } \sum_{i=0}^N \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L x_{ijkl} = 1 \quad j=1,2,\dots,N \quad (2)$$

$$\sum_{j=0}^N \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L x_{ijkl} = 1 \quad i=1,2,\dots,N \quad (3)$$

$$\sum_{i=0}^N \sum_{k=1}^K x_{ipkl} - \sum_{j=0}^N \sum_{k=1}^K x_{pjkl} = 0 \quad (4)$$

$p=1,2,\dots,N$ and $l=1,2,\dots,L$

$$\sum_{i=0}^N D_i \cdot \left(\sum_{j=0}^N \sum_{k=1}^K x_{ijkl} \right) \leq C \quad l=1,2,\dots,L \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^K x_{0jkl} \leq 1 \quad l=1,2,\dots,L \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K x_{i0kl} \leq 1 \quad l=1,2,\dots,L \quad (7)$$

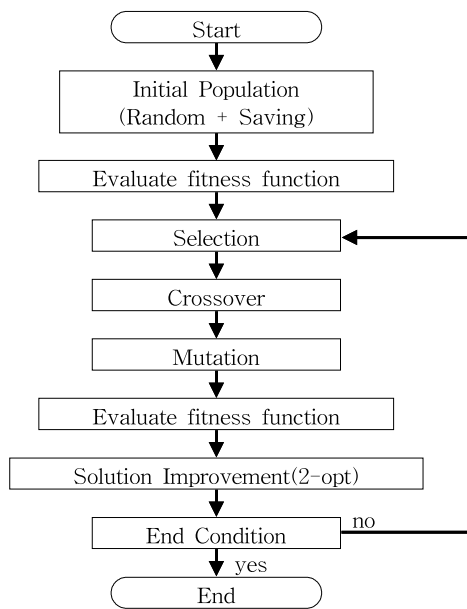
$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_{ijkl} \leq |T| - 1 \quad k = 1, 2, 3 \text{ and } l = 1, 2, \dots, L \quad (8)$$

$$x_{iikl} = 0, \quad x_{jjkl} = 0 \quad \forall i, j, k, l \quad (9)$$

$$x_{ijkl} = \begin{cases} 1, & \text{차량 운행시} \\ 0, & \text{차량 미운행시} \end{cases} \quad \forall i, j, k, l \quad (10)$$

본 모형의 목적함수 식(1)은 차량의 이동 시간과 수요지에서의 서비스 시간의 합인 총 소요시간을 최소화시키는 것이다. 제약함수 식(2)와 식(3)은 각 수요지에는 한 대의 차량만이 방문할 수 있다는 1회 방문의 제약을 의미하고, 제약함수 식(4)는 차량이 임의의 수요지에 도착하여 서비스 종료 후에 반드시 다른 수요지나 차고지로 출발해야 한다는 차량 흐름의 연속성을 나타낸다. 제약함수 식(5)는 각 경로에 포함된 수요지의 총 수요는 차량의 적재 용량을 초과할 수 없음을 의미하고, 제약함수 식(6)과 식(7)은 차고지를 출발하는 가용차량이 반복 운행할 수 없음을 의미한다. 제약함수 식(8)은 차량의 출발과 종착이 차고지에서만 이루어지므로 수요지들간의 부분 경로 형성을 방지하기 위한 제약이며, 수요지의 수 N 에 따라 $2^N - 1$ 개의 식으로 구성된다. 제약함수 식(9)는 동일지점을 운행할 수 없다는 의미이고, 제약함수 식(10)은 수요지간의 차량운행이 있으면 1, 없으면 0을 나타내는 결정변수 제약이다.

III. Hybrid 유전자 알고리즘



<그림 1> Hybrid 유전자 알고리즘 수행절차

본 연구에서는 원할·지체·정체의 3가지 교통상황과 수요지의 수요가 확률적으로 변화하는 차량경로문제에서 총 소요시간을 최소화하기 위하여 유전자 알고리즘에 Saving 알고리즘과 2-opt 휴리스틱 기법을 혼합한 Hybrid 유전자 알고리즘을 구축하였으며, 수행절차는 <그림 1>과 같다.

1. 유전자 표현

본 연구의 유전자 표현(Gene Representation)은 <표 1>과 같이 2개의 String으로 이루어진 이중구조로 설정하였다. 수요지는 수요지의 번호를 나타내지만 불필요한 부분으로 실제 구성은 하지 않았으며, 우선순위는 각 수요지의 방문 우선순위를 표현하였고, 차량번호는 각 수요지의 방문차량을 나타내는 것으로 유전자에서 표현된 개체는 차량번호를 의미한다.

예를 들어, <표 1>에서 3번 차량의 경우는 차량경로가 D(Depot)-4-6-8-D인데, 방문 우선순위를 고려하면 D-6-4-8-D인 경로를 구성하게 된다.

<표 1> 유전자 표현

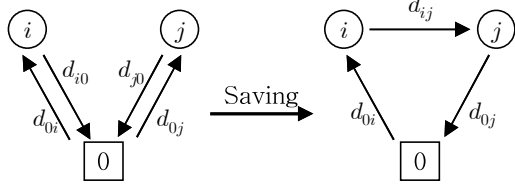
수요지	1	2	3	4	5	6	7	8
우선순위	2	8	5	6	4	1	3	7
차량번호	1	2	1	3	2	3	1	3

2. 초기 모집단

초기 모집단(Population)을 생성하는 방법으로는 문제의 특성에 따라 발견적 기법, 임의생성 기법, 혼용 기법이 사용되는데 본 모형에서는 임의생성 기법과 Saving 알고리즘을 혼합한 혼용 기법을 이용하여 구성 하였다.

임의생성 기법은 다양한 해 공간을 탐색할 수 있다는 장점이 있으나 실행 불가능해가 다수 포함되어 효과적인 해의 탐색이 어려운 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 임의 생성된 초기 해를 바탕으로 각 차량에 대한 수요지를 순서대로 방문하여 적재용량의 제약조건을 만족하면 차량의 경로에 포함시키고, 제약조건을 만족하지 못하면 다른 수요지로 바꾸어 주었다. 이는 차량과 수요지간의 재결합 과정으로 차량의 용량제약을 만족하도록 초기 해를 교정하여 실행 불가능 해를 실행 가능해로 바꾸어 주었다.

Saving 알고리즘은 <그림 2>와 같이 더 경제적인



[a] 각 수요지에 배차 [b] 각 수요지를 경유
 <그림 2> Saving 알고리즘

경로를 형성할 수 있도록 유도하여 우수한 초기 해를 산출해주는 역할을 한다.

<그림 2>의 [a]와 같이 차고지에서 각 수요지에 한대씩 배차하는 경우와 [b]와 같이 수요지 i 에 배차된 차량이 수요지 j 를 경유해서 복귀한다고 할 때 [a]와 [b]의 거리 차이가 절약(S_{ij} : Saving)이며, [a]의 경우 총 이동거리가 $d_{0i} + d_{i0} + d_{0j} + d_{j0}$ 이고, [b]의 경우 총 이동거리가 $d_{0i} + d_{ij} + d_{j0}$ 이므로 절약 S_{ij} 는 $d_{i0} + d_{0j} - d_{ij}$ 로 나타낼 수 있다.

절약 값을 구한 후 크기의 내림차순으로 정리하여 절약목록을 작성하고, 이 절약목록에서 절약이 가장 큰 수요지로 경로를 형성하는데 이는 최초 구성된 경로보다 S_{ij} 만큼의 거리가 절약된다.

3. 적합도 평가

적합도(Fitness) 평가는 목적함수를 만족시키는 정도를 의미한다. 본 연구의 목적함수인 총 소요시간의 최소화를 위해 적합도 평가 함수는 식(11)과 같이 총 소요시간이 적을수록 높은 적합도 값을 얻을 수 있는 총 소요시간의 역수로 하였다.

$$fitness = \frac{1}{\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L t_{ijkl} \cdot x_{ijkl} + \sum_{i=1}^N S_i} \quad (11)$$

4. 선별

선별(Selection)은 적자생존의 자연법칙에 기초하여 환경에 대한 적합도에 의해 현 세대의 모집단으로부터 다음 세대에 생존할 개체를 선택하는 과정이다. 세대별 우수한 해의 생존을 보장하고, 지역해로의 수렴을 방지하기 위하여 적합도가 작은 해의 생존을 확률적으로 보장해주는 룰렛 휠(Roulette Wheel) 방법을

적용하였으며, 집단 내에서 가장 강한 개체가 다음 세대로 변경되지 않고 전달되는 것을 보장하기 위하여 세대별 우수한 해는 반드시 생존할 수 있도록 하는 엘리트 보전전략(Elitism Strategy)을 적용하였다.

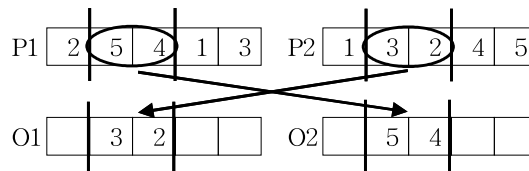
5. 유전 연산자

유전 연산자는 두 부모해의 유전자를 조합하여 새로운 자손 유전자를 생성하는 과정인 교차(Crossover)와 해 공간을 다양하게 탐색하는 역할을 하는 돌연변이(Mutation)로 구분된다.

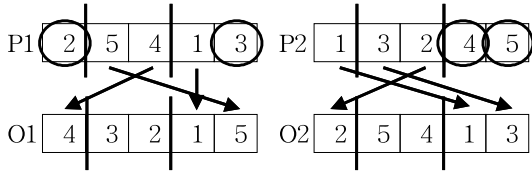
교차 방법은 각 수요지의 방문 우선순위가 차량경로를 구성함에 있어 중복되면 경로가 형성되지 않으므로 우선순위의 상대적인 순서가 유지되는 순서교차(Order Crossover)를 적용하였으며, 각 수요지에 할당된 차량번호는 2점 교차(Two-Point Crossover)를 적용하였다.

수요지의 방문 우선순위에 적용한 순서교차의 절차는 다음과 같다.

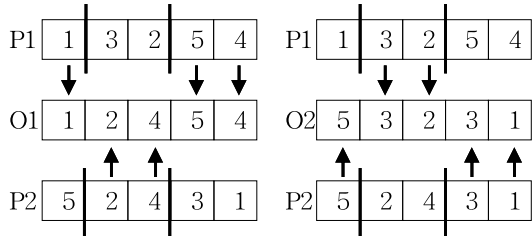
- 단계 1 : 각각의 개체들에 난수를 발생시키고, 교차확률과 비교하여 교차대상자를 선정한다.
- 단계 2 : 교차대상자로 선정된 개체들에 대하여 짝을 지워준다.
- 단계 3 : 짝지어진 개체들에 대하여 임의로 2개의 절단점을 선정한 후 절단점 내의 유전인자를 상대방에게 상속하며, <그림 3>과 같다.
- 단계 4 : 방문 우선순위의 빈칸에는 두 번째 절단점 이후부터 부모의 유전인자를 차례대로 나열한 후 상대방 개체로부터 상속된 유전인자는 제거하고, 상속되지 않은 유전자를 두 번째 절단점 이후부터 순서대로 채워 넣으며, <그림 4>와 같다(P1에서 두 번째 절단점 이후의 인자는 1-3-2-5-4가 되며, P2로부터 상속된 2와 3을 제거하면 1-5-4가 남게 되고, 남은 인자를 두 번째 절단점 부터 채우면 4-3-2-1-5가 된다).



<그림 3> 절단점 내의 유전인자 상속



<그림 4> 절단점 외의 유전자 상속



<그림 5> 2점 교차

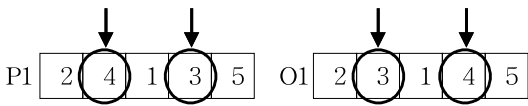
차량번호에 적용한 2점 교차의 절차는 <그림 5>와 같다.

- 단계 1 : 순서교차의 단계 1과 단계 2를 실시한다.
- 단계 2 : 임의의 두 절단점을 선정하여 처음, 중간, 끝의 3부분으로 구분한다.
- 단계 3 : O1은 P1에서 처음과 끝 부분을 상속받고, P2로부터 중간부분을 상속받는다.

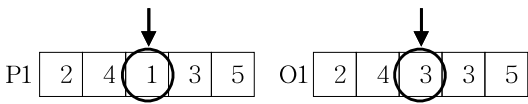
돌연변이 방법으로 차량의 방문 우선순위는 돌연변이를 통해 중복되는 유전자가 발생하지 않도록 교환(Exchange) 돌연변이를 적용하였으며, 차량번호는 같은 차량이 할당되어도 무방하여 점(Point) 돌연변이를 적용하였다.

차량의 방문 우선순위에 적용한 교환 돌연변이의 절차는 <그림 6>과 같다.

- 단계 1 : 돌연변이 확률에 의해 그 실시 여부를 결정한 후, 임의의 두 개체를 선정한다.
- 단계 2 : 두 개체를 서로 교환한다.



<그림 6> 교환 돌연변이



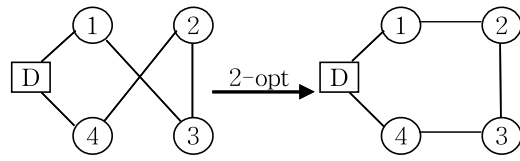
<그림 7> 점 돌연변이

차량번호에 적용한 점 돌연변이 절차는 <그림 7>과 같다.

- 단계 1 : 돌연변이 확률에 의해 그 실시 여부를 결정한 후, 임의의 한 개체를 선정한다.
- 단계 2 : 선택된 개체의 위치에 1에서 차량의 수 사이의 난수를 발생시켜 선택된 개체를 변경한다.

6. 해 개선

구성된 차량경로를 개선하기 위하여 차량의 경로를 조정하는 방법으로 2-opt 기법을 적용하였다. 2-opt 기법은 차량경로에서 임의의 두 경로를 바꾸어 적합도 개선 여부를 확인한 후 적합도가 개선되면 그 결과를 반영하는 지역 탐색(Local Search) 알고리즘으로 <그림 8>과 같으며, 세대 초기부터 우수한 해를 얻기 위하여 매 세대 적합도 평가 이후 가장 우수한 해에 적용하였다.



<그림 8> 2-opt

7. 유전 파라미터

유전자 알고리즘이 확률과 파라미터에 의하여 다양한 결과를 발생시키기 때문에 유전자 알고리즘의 성능을 좌우하는 몇 가지 요인들을 고려해야 한다. 이러한 요인들로는 모집단 크기(Population Size), 교차 확률(P_c), 돌연변이 확률(P_m), 종료 세대수 등을 들 수 있다. 본 연구에서는 유전 파라미터들이 적합도에 미치는 영향을 반복 실험을 통해 비교한 후 알고리즘과 문제의 특성에 맞는 파라미터를 적용하였으며, 본 연구의 유전 파라미터는 <표 2>와 같다.

<표 2> 유전 파라미터

유전 파라미터	모집단 크기	교차확률 (P_c)	돌연변이 확률(P_m)	종료 세대수
적용 값	100	0.8	0.02	1,000

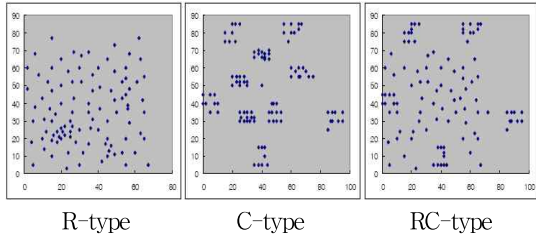
IV. 수리모형 검증 및 알고리즘 실험결과

1. 실험 계획

본 연구에서는 Solomon(1987)이 제시한 실험 예제 중에서 차고지 1개, 수요지 25개인 예제에 대하여 유형별로 1문제씩(R-101, C-101, RC-101) 선정하여 실험하였다. Solomon의 예제는 수요지의 분포에 따라 3가지 유형으로 분류되는데 사분면에 임의(Randomly)로 분포된 R-type, 밀집(Clustered)되어 있는 C-type, 임의와 밀집이 혼합(Mixed)되어 있는 RC-type이 있으며, <그림 9>와 같다.

수요지간의 거리는 유클리드 내적을 이용하였으며, 각 수요지에서의 서비스 시간은 10분, 차량의 용량은 150으로 실험을 수행하였다. 수요지별 수요는 알려진 범위 내에서 임의의 확률로 결정하여 적용하였으며, 수요의 범위와 중간 값은 <표 3>과 같다.

교통상황은 원활·지체·정체의 3개 상황으로 구분하고, 차량의 속력은 원활 60km/h, 지체 30km/h, 정체 15km/h로 적용하였으며, 각 경로별 교통상황은 <표 4>와 같다.



<그림 9> Solomon 예제의 유형별 수요지 분포

<표 3> 수요 범위 및 중간 값

수요지	수요 범위	중간 값	수요지	수요 범위	중간 값
1	[5, 15]	10	14	[14, 34]	24
2	[7, 23]	15	15	[3, 17]	10
3	[4, 18]	11	16	[16, 22]	19
4	[12, 36]	24	17	[1, 5]	3
5	[15, 43]	29	18	[7, 15]	11
6	[1, 5]	3	19	[11, 23]	17
7	[4, 6]	5	20	[5, 13]	9
8	[5, 19]	12	21	[6, 14]	10
9	[9, 27]	18	22	[13, 31]	22
10	[12, 32]	22	23	[19, 55]	37
11	[6, 18]	12	24	[2, 6]	4
12	[15, 35]	25	25	[4, 10]	7
13	[18, 52]	35			

2. 수리모형 검증

본 연구에서 제안한 수리모형의 검증을 위해 수요지 5개, 차량 2대, 수요를 중간 값으로 하는 예제를 구성하고, CPLEX 11.1과 Hybrid 유전자 알고리즘을 이용하여 차량경로의 이동거리 및 총 소요시간을 산출한 후 비교하였으며, 수리모형 검증 결과는 <표 5>와 같다.

<표 5> 수리모형 검증 결과

구분	CPLEX 11.1	Hybrid GA
이동거리(km)	116.5115	116.5115
소요시간(분)	166.5115	166.5115

<표 4> 경로별 교통상황

교통상황(속력)	경로
원활(60km/h)	지체와 정체를 제외한 나머지 경로
지체(30km/h)	0→3/5/8/12/13/19/21/22, 1→2/4/9/11/13/17/22/23, 2→0/7/10/13/15/20/24, 3→1/5/12/14/19/25, 4→7/9/16/18/21, 5→0/1/15/20/21/22/25, 6→2/5/16/20, 7→4/8/10/13/15/18/22/24, 8→14/17/19/23, 9→1/2/6/17/19/25, 10→0/3/8/14/16/20, 11→15/16/19/22, 12→3/4/8/9/17/25, 13→0/1/5/7/11/19/24, 14→0/2/6/10/12/18/23, 15→1/8/13/14/17/20/21, 16→3/4/6/8/10/15/19/25, 17→0/2/8/13/18/22/25, 18→5/9/11/16/21, 19→3/5/8/12/13/18/20/24, 20→0/1/4/6/10/17/23, 21→4/8/9/15/16/19/25, 22→2/7/10/11/14/18/21/24, 23→0/6/12/16/20, 24→1/5/9/15/17/19/25, 25→3/8/13/14/20/22/23
정체(15km/h)	0→4/7/11/16/18/20/25, 1→0/6/7/12/15/19/20/24, 2→3/8/14/18/23, 3→0/2/4/9/13/16/21/24, 4→2/8/10/15/17/22, 5→3/6/13/14/18/23, 6→0/4/9/10/21, 7→1/11/14/17/23/25, 8→0/7/10/15/22, 9→4/5/13/16/20, 10→1/6/9/12/17/23, 11→0/8/12/18/25, 12→2/5/10/14/18/24, 13→3/6/12/15/21, 14→1/5/8/13/17/20, 15→0/4/6/11/16/22/25, 16→0/1/7/9/13/14/17/23, 17→3/6/15/19/21/24, 18→2/10/12/19/20, 19→1/9/11/14/21/22/25, 20→3/5/7/13/19/24, 21→0/3/5/10/12/18/20/22, 22→3/5/13/15/17/25, 23→5/8/10/19/24, 24→2/6/11/14/18/23, 25→0/2/7/12/15/16/21

CPLEX 11.1을 이용하여 산출한 수리모형의 이동거리 및 총 소요시간과 본 연구에서 제안한 Hybrid 유전자 알고리즘의 결과가 동일하게 도출되어 본 연구에서 제시한 수리모형의 타당성을 입증하였다.

3. 알고리즘 실험결과

본 연구에서는 원활·지체·정체의 3가지 교통상황이 존재하고, 수요지의 수요가 확률적으로 변화하는 상황에서 제한된 차량의 적재용량을 고려하여 총 소요시간을 최소화하는 차량경로문제에 최단거리의 수요지를 선정하여 경로를 형성하는 기법인 Nearest Neighbor Search(NNS), Saving 알고리즘(SAV), 일반 유전자 알고리즘(GGA, General GA), Hybrid 유전자 알고리즘(HGA)을 이용하여 각 10회 실험을 실시하였고, 경로를 구성한 후 이동거리와 총 소요시간의 평균값을 비교하였으며, 비교 결과는 <표 6>과 같다.

알고리즘별 10회 실험을 실시한 후 평균값을 비교한 결과 모든 유형의 예제에서 차량의 이동거리는 Saving 알고리즘이 최단경로를 산출하였다. 이는 Saving 알고리즘이 교통상황은 고려하지 않고, 수요지간의 거리 절약 값만을 이용하여 경로를 구성하기 때문이며, 본 연구에서 제안한 Hybrid 유전자 알고리즘은 교통상황을 고려하여 경로를 구성하므로 Saving 알고리즘에 비해 이동거리는 11.7~55.2km 증가하였으나 차량경로의 총 소요시간은 모든 유형의 예제에서 최단시간을 도출하였다. 또한 Nearest Neighbor Search, Saving 알고리즘, 일반 유전자 알고리즘을 이용한 실험 결과에 비해 89.5~1,798.1분의 총 소요시간을 단축할 수 있었다.

실험 예제 유형별로 Saving 알고리즘과 Hybrid 유전자 알고리즘에 평균적으로 적용된 교통상황은 <표 7>

<표 6> 알고리즘별 실험 결과(10회 평균)

구분		NNS	SAV	GGA	HGA
R-101	이동거리(km)	983.0	469.6	630.7	524.8
	소요시간(분)	2,650.7	1,257.2	942.1	852.6
C-101	이동거리(km)	359.7	236.3	333.4	248.8
	소요시간(분)	915.7	611.6	606.1	513.8
RC-101	이동거리(km)	958.3	408.2	562.1	419.9
	소요시간(분)	2,191.3	1,055.8	842.2	690.4

가장 우수한 해

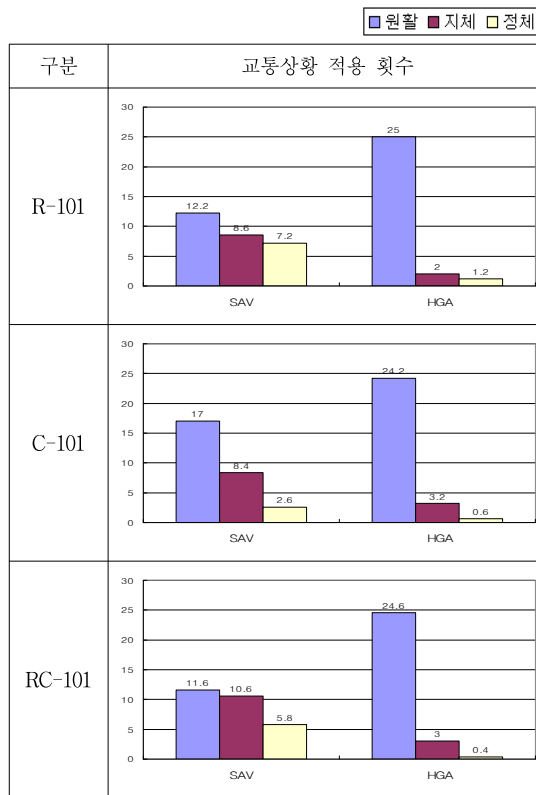
과 같다.

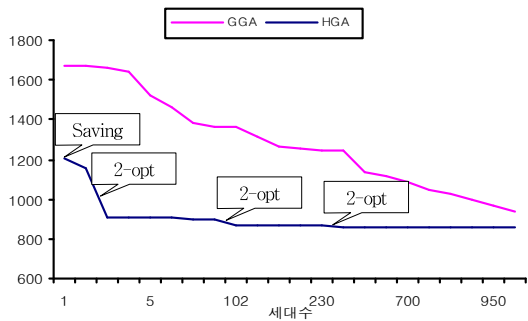
Saving 알고리즘은 수요지간의 이동거리를 최대로 절약할 수 있도록 경로를 구성하는 알고리즘으로 원활·지체·정체의 교통상황 적용횟수가 거의 유사하였으며, Hybrid 유전자 알고리즘은 교통상황을 고려하여 총 소요시간이 최소화가 되도록 경로를 구성하는 알고리즘으로 지체·정체의 교통상황을 가급적 피하는 원활한 경로 위주로 적용되었다.

본 연구에서 제안한 Hybrid 유전자 알고리즘의 해 개선속도를 확인하기 위하여 R-101예제를 대상으로 세대별 해를 일반 유전자 알고리즘과 비교하였으며, 비교 결과는 <그림 10>과 같다.

Hybrid 유전자 알고리즘의 초기 해가 일반 유전자 알고리즘에 비해 월등하게 우수한 결과를 보여주고 있다. 이는 초기 모집단 생성시 Saving 알고리즘을 적용함으로써 우수한 초기 해를 생성할 수 있었기 때문이다. 또한 세대가 진행될수록 그래프 간격의 차이가 점점 벌어지고, 약 100세대 이상 진행된 이후에 그래프의 간격이 점진적으로 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. Hybrid 유전자

<표 7> 교통상황 적용 횟수(10회 평균)





<그림 10> 세대별 해 비교

알고리즘이 우수한 초기 해를 바탕으로 해의 개선이 초기에 급격하게 진행되었으며, 이는 지역탐색 알고리즘인 2-opt 과정을 통하여 해의 개선이 가속됨으로써 약 230세대가 진행된 이후에 우수한 해로 수렴하는 등 본 연구에서 제안한 Hybrid 유전자 알고리즘의 효율성과 우수성을 확인하였다.

V. 결론

본 연구에서는 교통상황을 원활·지체·정체의 3가지 상황으로 구분하고, 수요지의 수요가 확률적으로 변화하며, 제한된 차량의 적재능력을 고려하여 총 소요시간을 최소화하는 차량경로문제(VRPTSSD)를 제시하였다.

도심지에서 발생하는 원활·지체·정체 교통상황과 확률적인 수요를 고려한 차량경로문제를 위한 Hybrid 유전자 알고리즘을 제시하였고, Nearest Neighbor Search, Saving 알고리즘, 일반 유전자 알고리즘과 이동거리 및 총 소요시간을 비교하였으며, 실험 결과 기존 해법에 비해 이동거리가 약간 증가하였으나 교통상황이 원활한 경로의 선정을 통하여 총 소요 시간을 단축할 수 있었다.

본 연구의 알고리즘을 활용하여 수요지간의 이동시간이 교통상황에 큰 영향을 받으므로, 이동경로의 교통이 혼잡하다면 다른 수요지를 선정하여 이동함으로써 소요 시간을 줄일 수 있으며, 변화하는 수요를 포함하는 최적의 차량경로를 구성함으로써 기업의 물류비용을 줄일 수 있을 것이다.

향후 연구방향으로 교통 데이터의 시계열 자료나 도로형태, 신호체계 등을 활용하여 교통 흐름의 분포를 추정함으로써 실질적인 교통상황을 적용하고, 신뢰성이 높은 고객의 예측된 수요를 반영하여 발전시킨다면 보다 효과적으로 현실문제에 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 김기태·전진욱(2009), “서비스 시간대별 교통상황을 고려한 차량경로문제”, 산업공학(IE Interfaces) 지, 제22권, pp.358~366.
2. 문기주·양승만(2004), “3구간 종속 가변속도 하에서 배송차량의 최적운영 방안에 관한 연구”, 대한설비관리학회지, 제9권, pp.145~154.
3. Bertsimas, D. J.(1992), “A Vehicle Routing Problem with Stochastic Demand”, Operations Research, Vol.40, pp.574~585.
4. Clark, G. and J. W. Wright(1964), “Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points”, Operations Research, Vol.12, pp.568~581.
5. Dantzig, G. B. and J. H. Ramser(1959), “The Truck Dispatching Problem”, Management Science, Vol.6, pp.80~91.
6. Gendreau, M., A. Hertz and G. Laporte(1992), “New Insertion and Postoptimization Procedures for the Traveling Salesman Problem”, Operations Research, Vol.60, pp.1086~1094.
7. Goldberg, D. and R. Lingle(1985), “Alleles, Loci, and The Traveling Salesman Problem”, Proceedings of the First International Conference on Genetic Algorithms and their applications, pp.154~159.
8. Houghton, M. A.(1998), “The Performance of Route Modification and Demand Stabilization Strategies in Stochastic Vehicle Routing”, Transportation Research, Vol.32, pp.551~566.
9. Houghton, M. A. and A. J. Stenger(1999), “Comparing Strategies for Addressing Delivery Shortages in Stochastic Demand Settings”, Transportation Research, Vol.35, pp.25~41.
10. Hill, V. and W. C. Benton(1992), “Modeling Intra-City Time-Dependent Travel Speeds for Vehicle Scheduling Problems”, Journal of Operational Research Society, Vol.43, pp.343~351.

11. Laporte, G.(1992), "The Vehicle Routing Problem: An Overview of Exact and Approximate Algorithms", European Journal of Operational Research, Vol.59, pp.345~358.
12. Laporte, G., F. V. Louveaux and L. Van Hamme(2002), "An Integer L-Shaped Algorithm for the Capacitated Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands", Operations Research, Vol.50, pp.415~423.
13. Malandraki, C. and M. S. Daskin(1992), "Time Dependent Vehicle Routing Problems: Formulation, Properties and Heuristic Algorithms", Transportation Science, Vol.26, pp.185~200.
14. Reimann, M.(2005), "Analyzing a Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands Using Ant Colony Optimization", Advanced OR and AI Methods in Transportation, Poznan Technical University Publishers, pp.764~769.
15. Solomon M. M.(1987), "Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problems with Time Window Constraints", Operations Research, Vol.35, pp.254~265.
16. Stewart, W. R. and B. L. Golden(1983), "Stochastic Vehicle Routing: A Comprehensive Approach", European Journal of Operational Research, Vol.14, pp.371~385.
17. Tillman, F. A.(1969), "The Multiple Terminal Del-very Problem with Probabilistic Demands", Transportation Science, Vol.3, pp.192~204.

✉ 주 작 성 자 : 김기태

✉ 교 신 저 자 : 전건욱

✉ 논문투고일 : 2010. 1. 29

✉ 논문심사일 : 2010. 4. 15 (1차)

2010. 6. 14 (2차)

2010. 7. 28 (3차)

✉ 심사판정일 : 2010. 7. 28

✉ 반론접수기한 : 2011. 2. 28

✉ 3인 익명 심사필

✉ 1인 abstract 교정필