

수배송 서비스를 위한 운송계획 최적화 시스템 개발

최지영¹ · 이태한^{2*} · 임재민¹

¹한국전자통신연구원 물류기술연구팀 / ²전북대학교 산업정보시스템공학과, 공업기술연구센터

Development of a Planning System for the Routing and Scheduling of Vehicles in Pickup and Delivery Services

Jiyoung Choi¹ · Taehan Lee² · Jaemin Lim¹

¹Logistics Technology Research Team, Electronics and Telecommunications Research Institute, Daejeon, 305-700

²Department of Industrial and Information Systems Engineering, Chonbuk National University, Chonju, 561-756

In this paper, we develop a planning system for the routing and scheduling of vehicles in pickup and delivery service such as door-to-door parcel service. Efficient routing and scheduling of vehicles is very important in pickup and delivery service. The routing and scheduling problem is a variation of vehicle routing problem which has various realistic constraints. We develop a heuristic algorithm based on tabu search to solve the routing and scheduling problem. We develop a routing and scheduling system installed the algorithm as a planning engine. The system manages the basic data and uses GIS data to make a realistic route plan.

Keyword: routing and scheduling, vehicle routing, tabu search

1. 서론

차량경로문제는 고객의 화물을 배달, 수집하는 화물 수송 차량 경로문제, 서비스 센터의 고객의 할당 및 방문순서를 결정하기 위한 서비스 차량경로문제, 승객의 수송을 위한 차량경로문제 등 사회 전반에서 다양한 형태로 나타나는 의사결정문제로서 오랜 시간에 걸쳐 연구되어 왔다. 이러한 다양한 형태의 서비스는 단일 혹은 복수 차량거점, 단일 혹은 복수 차량 유형, 시간대별 이동 시간, 방문시간 제약 등과 같은 특성들로 구분된다.

이 논문에서는 수배송 서비스의 수집 및 배달 경로계획을 위한 경로계획 시스템의 개발을 다룬다. 수배송 서비스의 수집 및 배달 경로계획 문제는 위에서 설명한 경로계획문제의 여러 특성들이 복합적으로 나타나며, 경로의 순서뿐만

아니라 각 경로에서 거점의 방문 시간을 동시에 결정하는 routing and scheduling 문제(Solomon, 1987)로 본 논문에서는 이를 운송 계획문제로 부르고 해당 시스템을 운송계획 시스템으로 부르고 한다. 운송계획 시스템의 개발은 크게 운송계획문제를 해결하기 위한 알고리즘의 개발과, 데이터를 관리하고 사용자가 경로 계획 및 결과를 활용할 수 있도록 하는 사용자 정보 인터페이스를 제공하는 정보시스템의 개발로 이루어진다.

본 논문은 논문에서 고려하는 수배송 운송계획문제 및 가능한 변형들을 2절에서 살펴보고, 3절에서는 운송계획 수립을 위한 알고리즘 및 성능 시험, 4절에서는 알고리즘을 탑재하고 효율적 운송계획 수립이 가능하도록 지원하는 운송계획 최적화 시스템의 개발에 대하여 살펴보고, 5절에서 결론을 맺는다.

*연락처 : 이태한 박사, 전북 전주시 덕진구 덕진동 1가 664-14, 전북대학교 산업정보시스템공학과, Tel. 063-270-4220, Fax. 063-270-2333

E-mail : myth0789@chonbuk.ac.kr

2006년 3월 접수, 2회 수정 후 2006년 6월 게재확정.

2. 운송계획문제

이 절에서는 본 논문에서 고려하는 운송계획문제에 대하여 살펴본다. 운송계획문제는 서론에서 설명하고 있듯이 차량경로 문제(Vehicle Routing Problem, VRP)의 하나라고 할 수 있다. 차량 경로문제는 많은 변형들과 그에 대한 많은 연구들이 수행되었다. 본 논문은 운송계획의 효율적 수립을 위한 시스템 개발을 목적으로, 시스템의 활용에 있어 요구되는 운송계획문제의 특성과 기존의 연구에 대하여 살펴본다.

2.1 운송계획문제 정의

운송계획문제의 입력 정보는 다수의 거점(배송센터)과 다수의 고객(서비스 요구 고객의 개념) 정보, 각 고객들의 수요 정보, 거점-고객 및 고객-고객 간 거리 및 이동시간 정보, 수배송을 수행할 차량의 종류, 각 차종 별 적재용량 및 가용대수, 그리고 단위운행비용 혹은 운행비용 산식으로 구성된다. 운송계획문제는 이와 같은 입력정보를 바탕으로 다양한 고려사항 및 제약 조건을 만족시키는 동시에 총 운행비용, 총 운행거리, 총 운행시간 등의 특정한 목적 함수를 최소화하는 각 차량 별 운행경로, 고객 방문순서 및 시각, 그리고 고객수요 할당 등을 구하는 의사결정문제이다. 이를 간단히 도식화 하면 다음의 <Figure 1>과 같다.

운송계획문제의 입출력 정보를 정리하면 아래와 같다.

- 입력 정보
 - 거점(DP) 정보: 수, 위치, 서비스 제공 시간대, 가용 차종 및 대수
 - 고객(C) 정보: 수, 위치, 수요 타입, 수요량, 시간대
 - 링크 정보: DP-DP간, DP-C간, C-C간 거리 및 이동 시간 정보
 - 차량 정보: 가용 차종, 각 차종 별 용량, 비용 산정 방법
- 제약조건
 - 모든 고객의 수요를 처리해야 함
 - 경로 특성 및 제약을 만족해야 함
- 출력 정보
 - 고객 수요 처리에 투입될 차종 및 각 종별 대수
 - 각 차량 별 경로 및 스케줄, 고객 수요 처리 내역
 - 비용, 시간 등의 해 평가 정보

- 목적함수

- 총 운행비용 최소화(총 운행비용=고정비+거리×거리당 유류비용+시간×시간당 인건비)
- 총 운행거리 최소화
- 총 운행시간 최소화

위의 제약조건에서 경로 특성 및 제약은 계획 수립 시 선택할 수 있는 문제의 옵션으로 생각할 수 있다. 동일한 입력 정보에 대해서도 거점 수, 고려하는 차량의 종류의 수, 고객 수요 형태, 고려하는 경로의 형태 등에 따라 최적의 계획도 변화하게 되며, 이는 계획 수립 시에 문제의 제약 조건으로 반영이 된다. 목적함수는 위 세 가지 중 하나를 선택하여 고려하게 된다. 본 논문에서 고려하고 있는 가능한 옵션들을 정리하면 아래와 같다. 운송계획 최적화 시스템은 아래의 여러 옵션들을 바꿔가며 비교 분석할 수 있는 기능이 요구된다. 따라서 본 논문에서 다루고 있는 운송계획문제는 아래와 같은 제약들을 따로 혹은 동시에 선택적으로 고려하는 다양한 형태의 운송 계획 문제가 된다.

- 복수 거점

- 다수의 거점이 존재하는 상황을 고려하며, 각 거점은 위치, 규모 등의 물리적 특성 외에도 서비스 제공 시간대, 보유 차량 종류 및 대수 등의 부가적 특성을 가진다.

- 복수 차량유형

- 한 가지 종류의 차량이 아닌 다수의 차종을 고려한다. 각 차종 별로 적재용량과 운행비용을 고려한다.
- 각 거점 별로 가용한 자체 차량과 함께 임대차를 활용하고, 자체 차량과 임대차 사용의 우선순위를 고려한다.

- 시간제약이 있는 복수 고객 수요

- 고객의 수요는 거점으로부터 실물의 배송을 원하는 배달(D), 실물의 수집을 요구하는 수집(P)으로 나눌 수 있다. 이외에 하나의 수요가 배달과 수집으로 이루어져 수집 지점에서 물품을 실은 차량이 직접 배송 지점에 방문하여 배달하는 것을 나타내는 수요 형태도 고려한다.
- 고객의 수요는 수요 타입, 부피, 무게 등의 기본적인 특성 외에 서비스의 실행이 요구되는 시간대를 포함하며, 이 시간대는 복수 개일 수 있다. 또한 특정 거점으로부터 서비스를 받아야 한다는 특성을 고려할 수 있다.
- 한 고객은 운송계획 의사결정의 대상 계획기간의 범위 내

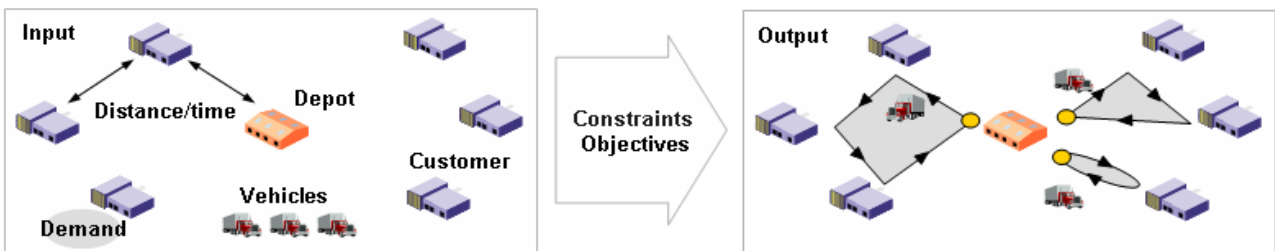
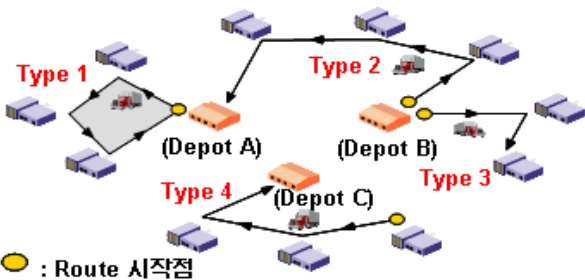


Figure 1. Vehicle Routing and Scheduling Problem.

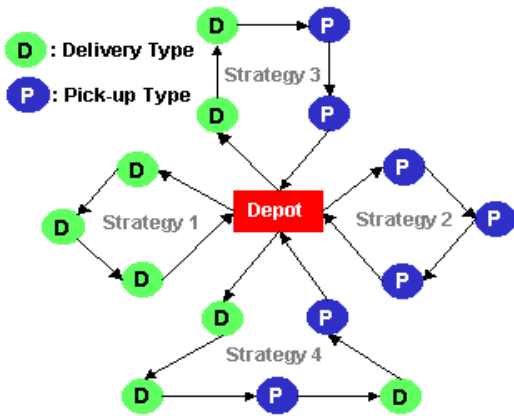
에서 다수의 수요를 가질 수 있으며 각 수요는 위와 같은 특성을 가진다.

● 복수 차량 운행경로 유형

- 차량 운행경로의 형태는 <Figure 2>의 (a)와 같이 출발지와 도착지에 따른 네 가지 기본적인 형태를 고려하며, 주어진 운송계획문제에서는 네 가지 타입의 경로 모두를 혹은 특정한 일부의 경로(들)만을 고려할 수 있다.
- 출발지와 도착지에 따른 형태 중 한 타입의 경로를 통하여 서비스를 실행할 때 고려할 수 있는 차량 운행경로에는 <Figure 2>의 (b)와 같이 수요 형태 및 처리 순서에 따라 배달 형태의 수요만을 연속적으로 처리하는 유형 1, 수집 형태의 수요만을 연속적으로 처리하는 유형 2, 배달 형태의 수요를 연속적으로 처리하고 난 후 수집 형태의 수요를 연속적으로 처리하는 유형 3, 그리고 배달 형태의 수요와 수집 형태의 수요를 복합적으로 처리하는 유형 4의 네 가지 타입이 있으며, 주어진 운송계획문제에서는 이들 네 가지 타입의 차량 운행경로 모두 혹은 특정한 일부의 유형(들)만을 고려할 수 있다.



(a) Route types classified by departure node and arrival node



(b) Route types classified by demand types and visit sequence

Figure 2. Route types.

- <Figure 2>의 (b)에서는 편의상 (a)의 경로 유형 1을 대상으로 네 가지 수요 형태 및 처리 순서에 따른 경로 유형을 도시하였으며 이는 (a)의 경로 유형 2에도 적용된다. 그러나 (a)의 경로 유형 3은 (b)의 경로 유형 1만이며, (a)의 경로 유형 4는 (b)의 경로 유형 2만이 적용 가능하다.

● 복수 trip

- 하나의 차량이 <Figure 2>의 (a)의 경로 유형들 중에서 하나에 할당되어 일련의 서비스 작업지시를 받아 서비스 완료 후 특정 종점에 도착하기까지의 여정을 하나의 trip이라고 할 때, 동일한 차량이 운송계획의 대상 계획 기간 내에서 다수의 trip을 수행할 수 있다. 이때 계획기간 중의 각 차량 별 최대운행시간, 혹은 최대운행거리의 한계 등을 부가적으로 고려할 수 있다.
- 이 고려사항은 자체 차량의 가동률을 높인다는 측면에서 제기될 수 있는 사항이며, 이 경우에는 주로 (a)의 경로 유형 1과 경로 유형 2 형태의 경로들의 연속적 혹은 복합적 사용이 현실적인 고려대상이 된다.

● 비대칭 거리와 시간

- 임의의 두 노드(거점 및 고객)사이의 거리와 운행 소요시간은 비대칭적이다. 즉 노드 A에서 노드 B로 이동하는 거리 및 소요시간은 그 반대 방향으로 이동하는 거리 및 소요시간과 다를 수 있다.

● 시간대별 이동 시간

- 노드 A에서 노드 B로 이동하는 거리는 일정할 수 있으나, 이동시간은 교통상황 등으로 인하여 계획기간 내에서 시간 혹은 시간대 별로 변동할 수 있으며, 이에 대한 예측치 등의 자료가 확정적으로 주어진 경우에 이를 고려할 수 있다.

● 기타

- 계획기간 전체에 각 차량 혹은 차종 별 총 운행시간, 총 운행거리 상하한 고려
- 개별 trip별 운행 시간, 운행 거리, 방문 고객 수 상하한 고려
- 수요 처리 시간: 개별 수요를 처리하는 데에 소요되는 작업시간을 고려할 수 있다. 고정 값을 고려하는 방안, 서비스에 따른 변동 값을 고려하는 방안, 혹은 병행하는 방안 등이 있을 수 있다.
- 거점-고객 간 정합성: 고객 혹은 고객의 특정수요 별로 서비스를 받을 수 있는 거점 후보가 존재하는 상황을 고려할 수 있다. 거점 입장에서는 서비스를 제공할 수 있는 고객 혹은 특정 수요가 존재한다.
- 고객-고객 간 정합성 및 우선순위: 어떤 두 고객은 동일한 경로에 할당할 수 없다든지 혹은 해야 한다든지 하는 사항과 같은 경로에 할당될 경우의 순서에 대한 우선순위를 고려할 수 있다.
- 거점-차량 간 정합성: 개별 고객을 방문할 시에 방문 가능한 차량 종류를 고려할 수 있다.

2.2 기존 연구

앞에서 살펴본 바와 같이 본 논문에서 다루는 운송계획문제는 차량경로문제들이다. 특히, 앞에서 살펴보았듯이 여러 가지 고려사항의 선택에 따라 서로 다른 특성을 갖는 다양한 형태의 운송 계획 문제를 다룬다. 각 옵션들의 선택에 따라 해당되는

차량 경로 문제들을 분류하면 <표 1>과 같다. <Table 1>에서 ‘-’는 기본적인 차량경로문제(Vehicle Routing Problem, VRP)를 의미한다. 분류된 각각의 문제들이 해결하기 어려운 문제(NP-hard)들이며, 각 문제들 별로 아래와 같이 많은 연구들이 수행되었다.

Table 1. Classification of VRP

Classification		Problem
Depot	single	-
	multiple	Multi-Depot VRP (MDVRP)
Time window	not exist	-
	exist	VRP with time windows (VRPTW)
Multi-trip	not allowable	-
	allowable	Multi-Trip VRP (MTVRP)
Customer demand	pickup or delivery	-
	combined demand of pickup and delivery	Pickup and Delivery Problem (PDP)
	delivery after pickup	VRP with Backhauls (VRPB)
	pickup and delivery	VRP with Mixed Delivery and Pickup (VRPMDP)
Travel time	fixed	-
	time dependent	Time Dependent VRP (TDVRP)

거점의 수와 관련하여, 복수개의 거점을 갖는 문제인 복수 거점 차량경로문제(Multi-Depot VRP, MDVRP)에 대한 연구들이 있다. MDVRP는 복수 개의 거점과 각 거점에 할당된 차량이 있고 각 차량의 운송경로는 할당된 거점에서 시작하고 끝난다. 대부분의 MDVRP 알고리즘은 기본적인 차량경로문제 해법 절차를 적용하였다. Chao *et al.*(1993)은 다단계 휴리스틱을 제안하여, 고객을 가장 가까운 거점에 우선 할당한 후, 변형된 절약 알고리즘을 사용하여 각 거점에 대해 차량경로문제를 해결하였다. 그 후 이 해는 고객을 다른 거점으로 이동하는 방법에 의해 개선되었다. Renaud *et al.* (1996)은 타부 탐색을 사용하였다. 각 고객을 가장 가까운 거점에 할당한 후 차량경로문제를 Improved Petal heuristic(Renaud *et al.*, 1996)을 사용하여 초기 해를 생성하였다. 탐색 휴리스틱은 개선(fast improvement), 강화(intensification), 다양화(diversification)의 세 단계로 구성된다. 각 단계에서는 다른 경로 사이의 고객을 교환하기 위해 다양한 방법을 사용하였다. Cordeau *et al.*(1997)은 전형적인 차량경로문제의 세 가지 변형: Periodic Vehicle Routing Problem(PVRP), Periodic Traveling Salesman Problem(PTSP), MDVRP를 위해 타부 탐색을 제안하였다.

주어진 계획 기간 동안 동일한 차량이 여러 개의 경로에 할당이 가능한 경우, 이 문제는 복수 trip 차량경로문제(Multi-Trip VRP, MTVRP)가 된다. Taillard *et al.*(1996)은 차량경로문제 제약을 만족하는 경로 집합을 생성한 후 선택된 경로를 bin packing 알고리즘을 이용하여 조합하였다. Brandao and Mercer(1998)의 TSMTVRP 알고리즘은 이웃(nearest neighbor)과 삽입(insertion) 개념을 조합한 알고리즘에 의해 초기 해를 생성하고, 두 단계로 이루어진 타부 탐색을 적용하여 해를 개선하였다.

고객의 방문가능시간에 제약이 있는 경우, 이 문제는 시간 제약이 있는 차량경로문제(VRP with Time Windows, VRPTW)가 된다. VRPTW를 위한 알고리즘은 크게 해 수립과 해 개선의 두 타입으로 나누어진다. 해를 개선하는 알고리즘은 대부분 simulated annealing과 타부 탐색 등의 메타 휴리스틱이다. Hong and Park(2004)은 VRPTW를 위한 알고리즘으로 개미 해법(Ant Colony Optimization, ACO)과 지역탐색 해법으로 구성된 2단계 해법을 제시하였다. VRPTW의 자세한 내용은 Solomon(1987)을 참고하기 바란다.

수집 및 배달 서비스와 관련된 기존 연구에는 동일경로 제약이 있는 집배송 차량경로문제(Pickup and Delivery Problem, PDP)와 귀로 수거화물이 있는 차량경로문제(VRP with Backhauls, VRPB)가 있다. 일반적인 PDP에서 각 고객의 요구는 한 위치에서 특정 제품을 신고 그 제품을 다른 장소로 배달하기 위해 하나의 차량을 사용하는 것을 필요로 한다(Nanry and Barnes, 2000). Mosheiov(1998)는 하나의 경로를 나누어 서로 다른 차량에 할당하는 tour partitioning 기법을 적용하였다. 한편, VRPB에서 차량은 배달 고객에게 서비스하기 위해 거점에서 물건을 신고 고객에게 배달하며, 수집 고객에게서 새로운 제품을 수집하여 거점으로 온다. VRPB를 위한 알고리즘으로 Goetschalckx and Jacobs-Blecha(1989)는 1단계에서 spacefilling curve를 이용하여 초기 해를 생성하고, 2단계에서 부분제의 최적화에 기반을 두어 해를 개선하는 2단계 방법을 제안하였다. VRPB에 시간 제약이 있는 경우 이 문제는 시간 제약 및 귀로 수거화물이 있는 차량 경로문제(VRPB with Time Windows, VRPBWTW)가 되며, 이 문제를 위한 알고리즘으로 Thangiah *et al.*(1996)와 Toth and Vigo(1999)의 휴리스틱 알고리즘이 있다. 한편, Chung and Park(2004)은 배달을 수집에 우선하여 수행해야 한다는 가정을 완화하여 혼합 수행할 수 있도록 한, 배달과 수거가 혼합된 차량경로문제(VRP with Mixed Delivery and Pickup, VRPMDP)에 대해 유전 알고리즘을 개발하였다.

운송계획 시스템 개발과 관련된 기존의 연구로 Kim *et al.*(2002)은 ILOG Solver와 ILOG Dispatcher를 활용하여 GIS(Geographic Information System) 정보와 연계되고 메타휴리스틱 기법을 적용한 차량 일정계획 시스템을 개발하였다. Cao(1999)는 GIS 정보와 휴리스틱을 이용하여 Fiber Deployment Plan(FDP)을 위한 의사결정 지원 시스템을 개발하였으며, Derekenaris(2001)은 GIS와 GPS(Global Positioning System), GSM(Global System for Mobile communication) 기술을 이용하여 비상 상황 발생 시 앰블런스의 경로 계획 수립을 위한 시스템을 개발하였다.

3. 알고리즘

2절에서 살펴본 바와 같이 차량경로문제는 그 제약에 따라 다양한 특성을 갖는 문제가 된다. 또한, 이들 각각의 문제들이 대부분 다루기 어려운 NP-hard 문제들로 독자적인 많은 연구들이 행하여져 왔음을 살펴보았다. 운송계획 시스템은 이러한 각각의 문제들의 특성을 복합적으로 갖는 운송계획문제를 해결할 수 있어야 하며, 계산 시간에 대한 제약을 갖는다. 따라서 본 논문에서는 특정 제약을 갖는 문제에 대하여 성능이 좋은 알고리즘이 아닌 전체적인 제약의 조합에 대하여 전반적으로 좋은 성능을 갖는 휴리스틱 알고리즘을 개발하였다.

본 논문의 휴리스틱 알고리즘은 크게 네 단계로 이루어진다. 먼저, 거점이 복수 개인 경우 고객을 거점에 할당하는 고객 할당 단계, 각 거점 별로 절약 알고리즘을 이용해 초기 해를 생성하는 단계, 복수 trip을 허용하는 경우 bin packing 알고리즘을 적용하여 복수 trip을 생성하는 단계, 마지막은 타부 탐색을 이용하여 경로를 개선하는 단계이다. <Figure 3>은 휴리스틱 알고리즘의 전체 순서도를 나타낸다.

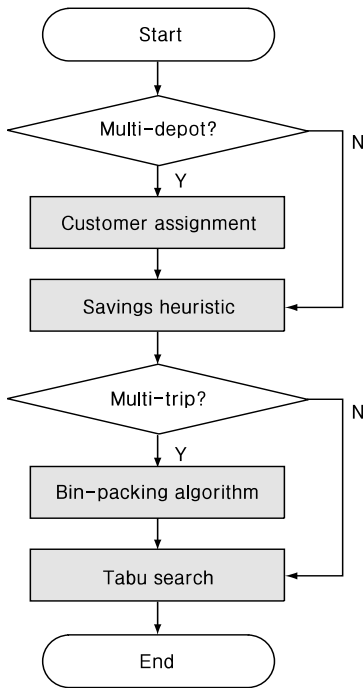


Figure 3. Flow chart of heuristic algorithm.

3.1 고객 할당

고객 할당 단계에서는 거점이 복수 개인 경우 각 고객을 거리 기준으로 가장 가까운 거점에 할당한다(Renaud *et al.*, 1996). 이때 거리는 GIS 도로 정보를 이용하여 실제 도로를 기반으로 계산한 지리상의 거리(Geographical Distance)로, 최단거리 알고리즘(shortest path algorithm)을 사용하여 두 지점 간 최단 거리를 구하여 사용하였다. 하나의 수요가 수집 또는 배달로 이루어진

경우 고객과 거점 간 양방향 거리의 평균을 이용하며, 하나의 수요가 수집과 배달로 이루어진 경우 수집 고객과 거점, 배달 고객과 거점 간 양방향 거리의 평균을 이용한다. 거점-고객 간 정합성 제약이 있는 경우 고객은 서비스를 받을 수 있는 거점 중 한 거점에 할당이 된다. 두 고객이 같은 경로 상에 있어야 하는 고객-고객 간 정합성 제약이 있는 경우 이 두 고객은 같은 거점에 할당한다.

[고객 할당]

- 단계 1 고객과 서비스를 받을 수 있는 거점과의 거리를 계산한다.
- 단계 2 고객과 거점과의 거리가 가장 짧은 거점에 고객을 할당한다. 단, 고객-고객 간 정합성 제약이 있고 다른 고객이 이미 거점에 할당된 경우 같은 거점에 할당한다.
- 단계 3 모든 고객을 거점에 할당한 경우 알고리즘을 종료하며, 그렇지 않은 경우 단계 1로 간다.

3.2 초기해 생성

초기 해 생성 단계에서는 절약 알고리즘(Clarke and Wright, 1964)을 적용해 초기 해를 생성한다. 복수 거점인 경우 각 거점 별로 할당된 고객을 대상으로 절약 알고리즘을 적용한다. 먼저, 모든 고객에 대해 거점-고객-거점 형태의 고객 수만큼의 경로를 생성한다. 그리고 모든 두 개의 경로 쌍에 대하여 두 경로를 합쳐 하나의 경로로 생성이 가능한가를 판정한다. 가능한 경우 목적함수의 감소치인 절약 값을 계산하여 가능한 모든 경로 쌍 중 절약 값이 제일 큰 두 경로를 합친다. 절약 값이 0보다 작은 값이 나올 때까지 이 과정을 반복한다.

[초기해 생성]

- 단계 1 모든 고객에 대해 거점-고객-거점 형태의 경로를 생성한다.
- 단계 2 두 고객이 같은 경로 상에 있어야 하는 경우 이 두 경로를 우선 합친다.
- 단계 3 모든 두 개의 경로 쌍에 대하여 두 경로를 하나의 경로로 합쳤을 때 절약 값을 계산하여 감소 순으로 정렬한다. 최대 절약 값이 0보다 작은 경우 알고리즘을 종료한다.
- 단계 4 절약 값이 큰 순으로 두 경로를 합쳤을 때 가능해인지 판단하여, 가능해인 경우 두 경로를 하나로 합친 후 단계 3으로 간다. 가능해가 존재하지 않는 경우 알고리즘을 종료한다.

3.3 복수 trip 생성

복수 trip을 허용하는 경우 하나의 차량이 거점에서 출발하여

돌아오는 여러 개의 경로를 운행할 수 있다. 이를 위하여 bin packing 알고리즘을 적용하여 가능한 복수 trip을 생성하였다. Bin-Packing Problem(BPP)이란, n 개의 아이템과 n 개의 용량 제약이 있는 knapsack(bin)이 있을 때, 각 아이템을 하나의 bin에 할당하여, 각 bin에 할당된 아이템의 무게의 총 합이 bin의 용량을 초과하지 않으면서 사용된 bin의 총 개수를 최소화 하는 문제이다.

본 논문에서는 잘 알려진 BPP에 대한 휴리스틱 알고리즘인 First-Fit Decreasing(FFD) (Martello and Toth, 1990) 알고리즘을 적용하였다. 이는 각 거점 별로 생성된 초기 경로를 운행시간이 감소하는 순으로 정렬한 후 순서대로 제약조건을 체크하여 이미 생성된 복수 trip에 할당하는 방법이다. 생성된 복수 trip이 없거나 제약조건을 만족하는 복수 trip이 없는 경우 새로운 복수 trip을 생성한다. 시간 제약이 있는 경우 각 경로의 출발시각과 도착시각을 고려하여 복수 trip을 생성하며, 각 거점별로, 생성된 모든 경로에 대해 이 과정을 반복한다.

[복수 trip 생성]

- 단계 1 모든 경로를 총 운행시간 감소 순으로 정렬한다.
- 단계 2 총 운행시간이 큰 경로부터 생성된 복수 trip 중 제약 조건을 만족하는 복수 trip에 할당한다. 생성된 복수 trip이 없거나 제약조건을 만족하는 복수 trip이 없는 경우, 하나의 경로로 구성된 새로운 복수 trip을 생성한다.
- 단계 3 모든 경로가 복수 trip에 할당된 경우 알고리즘을 종료하며, 그렇지 않은 경우 단계 2로 간다.

3.4 타부 탐색

생성된 초기 경로를 타부 탐색을 이용해 개선한다. 타부 탐색은 국소 해에 머물지 않고 종료 조건을 만족할 때까지 해를 찾는 과정을 계속하기 때문에 적어도 국소 해와 같거나 더 나은 해를 찾게 된다. 타부 탐색에서는 매 반복횟수마다 이웃 해 집합 $N_\lambda(S)$ 을 생성해 이 중에서 목적함수가 가장 많이 개선되거나, 개선되는 해가 없는 경우 목적함수의 증가가 가장 적은 해를 선택한다. 개선되지 않는 해를 선택하는 경우 이전의 해로 다시 돌아가 순환이 발생할 수 있으므로 이를 방지하기 위해 타부 제한을 둔다. 즉 새로운 가능 해를 생성한 후 이 해가 타부가 아닌 경우에 한해 $N_\lambda(S)$ 에 포함하며, 타부인지 아닌지를 확인하기 위해서 타부 목록(Osman, 1993)을 이용한다. 본 타부 탐색에서는 타부 목록에 어떤 노드가 어떤 경로로부터 몇 번째 반복횟수에서 빠져 나왔는지를 저장하여 원래 해 상태로 돌아가는 것을 방지한다. 순환을 방지하기 위한 타부 제약은 좋은 해가 있을 수 있는 곳으로 움직이는 것을 방해할 수 있다. 이러한 한계를 극복하기 위한 새로운 조건이 열망기준이다. 즉 새로운 가능 경로해 S' 이 타부라 하더라도 지금까지 발견된 가장 좋은 해 S_b 보다 더 좋은 경우 타부 상태를 무시하고 새로운 해로 받아들여 순환을 방지하면서 더 좋은 해를 찾는 것을 가능하게 한다.

이웃해 집합을 생성하는 방법으로 두 경로 간에 노드를 교환하는 방법인 Two-opt, Insertion, Or-exchange, Swap을 사용하였다(Toth and Vigo, 2003). Two-opt는 두 경로 사이에 연속된 노드의 집합을 서로 교환하는 방법이다. Insertion은 한 경로에서 다른 경로로 한 노드를 삽입하는 방법이며, 연속된 두 노드를 삽입하는 방법은 Or-exchange이다. Swap은 두 경로에 각각 포함된 하나의 고객을 서로 교환하는 방법을 의미한다. <Figure 4>는 이웃해 집합 생성 방법을 나타낸다.

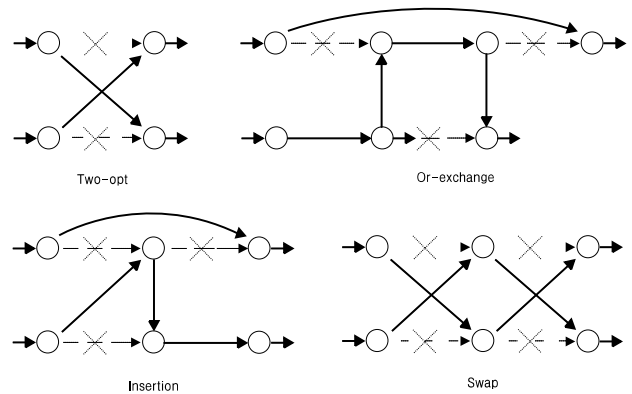


Figure 4. Neighborhood generation method.

짧은 링크와 중요한 링크(거점에 근접한 링크 및 제일 좋은 해에 속한 링크)만을 포함한 sparse graph가 사용되었으며(Toth and Vigo, 2003), 총 시간 제한, 총 거리 제한, 한 경로에 의해서 미스될 수 있는 총 고객 수 제한 등의 경로 제약에 대해 페널티를 사용하여 타부 탐색 중 비가능해를 허용하였다.

종료 조건으로 해가 개선되지 않은 상태에서의 반복횟수 k_b 가 해가 개선되지 않은 상태에서의 최대 반복횟수 $MAXK_b$ 이상인 경우($k_b > MAXK_b$) 타부 탐색을 종료하게 하였다. 타부 탐색 알고리즘 단계는 다음과 같다.

[타부 탐색]

- 단계 1 $S_b = S, k = 1, k_b = 0$ 으로 한다(k 는 현재 반복횟수 의미).
- 단계 2 이웃해 생성 방법을 임의로 선택하여 이웃 해 집합 $N_2(S)$ 를 생성한다. $N_2(S)$ 중 제일 좋은 가능 해 S' 을 선택해 $S = S'$ 으로 하고 $k = k + 1$ 로 한다. $C(S') < C(S_b)$ 인 경우 $S_b = S', k_b = 0$ 으로 하며, 그렇지 않은 경우 $k_b = k_b + 1$ 로 한다.
- 단계 3 $k_b > MAXK_b$ 인 경우 단계 4로 가며, 그렇지 않은 경우 단계 2로 간다.
- 단계 4 알고리즘을 종료하고, S_b 를 최종 해로 결정한다.

3.5 알고리즘 성능평가

알고리즘 성능 평가는 아무런 제약이 없는 기본적인 차량경로

문제를 포함하여 총 6가지의 문제유형에 대하여 수행하였다. 성능 평가를 위한 테스트 문제는 기존의 연구들에서 6가지 유형 별로 기존의 연구들에서 사용되고 있는 테스트 문제들을 활용하였다. 6가지 유형 별 테스트 문제는 VRP(Christofides *et al.*, 1979), VRPTW(Solomon, 1987), MDVRP(1)(Christofides and Eilon, 1969), MDVRP(2)(Chao *et al.*, 1993), VRPB(Goetschalckx and Jacobs-Blecha, 1989), TDVRP(Jeon, 2002)에서 확인할 수 있다. 알고리즘은 자동으로 코딩 되었고 Pentium 1.7 GHz PC를 사용하였다.

테스트 결과를 정리한 내용이 <Table 2>에 나타나 있다. ‘set’은 6가지의 문제 유형을 의미하며, ‘instance’는 각 유형 별 문제의 이름, ‘number of customer’는 문제가 포함한 고객의 수를 의미한다. ‘Best known sol.’은 지금까지의 각 문제에 대하여 알려진 가장 좋은 해의 목적식 값을 의미하며 *으로 표기된 것은 최적해임을 의미한다. 목적식 값은 최종 해의 총 거리 합을 의미하며, 이 때 거리는

테스트 문제에서 제시한 거리를 사용하였다. ‘Sol.’은 본 논문의 알고리즘을 통하여 얻은 해를 의미하며, ‘GAP(%)’은 ‘Sol.’과 현재까지 알려진 가장 좋은 해인 ‘best known sol.’의 차이의 퍼센트 비율(percentage ratio)을 의미한다.

표에서 제시하고 있는 기존 연구의 결과(best known sol.)는 해당 특정 문제에 대한 연구의 결과이다. 이와 달리 본 논문의 알고리즘은 아래의 6가지 형태의 차량 경로 계획 문제 및 그 조합을 모두 해결할 수 있도록 개발되었다. 이는 앞에서 설명한 사용자의 옵션 선택에 따라 구분되며, 알고리즘은 그에 따라 적용 모듈을 달리하여 해결하고 있다. 그 결과, 표에서도 보여 주듯이 알고리즘은 각각의 문제 유형들에 대한 연구의 결과들보다 더 좋은 결과를 주지는 못하고 있다. 그러나 대부분의 문제에서 기존의 각 문제 유형 별 행해진 연구들에 의해 얻어진 가장 좋은 해에 비하여 나쁘지 않은 해를 제공하고 있다. 알고리즘의 목적

Table 2. Computational results

Problem set	Instance	Number of customers	Best known sol.	Tabu search based algorithm		
				Sol.	Time (sec)	Gap (%)
VRP	vrpnc1	50	524.61	524.63	27.23	0.00
	vrpnc2	75	835.26	837.92	99.04	0.32
	vrpnc3	100	826.14	834.32	431.20	0.99
	vrpnc6	50	555.43	556.69	71.20	0.23
	vrpnc7	75	909.68	913.69	137.04	0.44
	vrpnc8	100	865.94	876.10	642.78	1.17
	vrpnc12	100	819.56	830.12	290.55	1.29
VRPTW	c101	100	828.94	828.94	75.29	0.00
	c201	100	591.56	591.56	121.45	0.00
MDVRP(1)	p01	50	576.87	576.87	21.41	0.00
	p02	50	473.53	474.54	51.63	0.21
	p03	75	641.19	643.57	191.76	0.37
	p04	100	1001.59	1013.93	454.64	1.23
	p05	100	750.03	759.14	345.76	1.21
	p06	100	876.50	888.40	192.95	1.36
	p07	100	885.80	898.28	267.27	1.41
MDVRP(2)	p12	80	1318.95	1332.22	161.36	1.01
	p13	80	1318.95	1344.04	113.69	1.90
	p14	80	1360.12	1371.06	168.08	0.80
VRPB	A1	25	229886*	229886	8.29	0.00
	A2	25	180119*	180119	6.14	0.00
	B1	30	239080*	239080	17.39	0.00
	B2	30	198048*	198048	15.07	0.00
	C1	40	249448*	250556.77	31.30	0.44
	C2	40	215020*	215020.23	29.15	0.00
	E1	45	238880*	240143.94	41.84	0.53
	E2	45	212263*	215036.35	35.96	1.31
	F1	60	263173*	267039.34	53.00	1.47
F2	60	265213*	266421.22	38.94	0.46	
TDVRP	155_1	15	1722.351	1749.732	4.89	1.59
	155_2	15	1756.965	1759.309	4.24	0.13
	155_3	15	1927.984	1947.435	5.06	1.01
	155_4	15	1457.073	1457.073	3.63	0.00
	1510_1	15	2357.569	2357.569	4.35	0.00
	1510_2	15	2319.951	2437.004	3.96	5.05
	1510_3	15	2665.07	2665.070	4.63	0.00
	1510_4	15	1881.892	1881.893	3.78	0.00
	1510_5	15	1935.119	1935.119	4.46	0.00

이 시스템에 탑재하여 사용자의 옵션에 따라 각 유형들이 복합적으로 나타나는 문제를 해결하고자 하는 것이므로, 계산 시간 및 해의 품질 면에서 요구되는 성능을 갖추었다고 할 수 있다.

4. 운송계획 시스템

운송계획 최적화 시스템은 운송계획을 수립하고자 하는 의사결정자가 효율적인 의사결정을 내릴 수 있도록 지원하기 위한 소프트웨어 도구이다. 시스템은 운송계획의 질을 높이고, 의사결정자의 숙련도 변화 등에 대한 운송계획의 성능의 변동을 감소시키는 데에 목적이 있다. 본 연구에서는 입출력 데이터 관리 기능, 운송계획 최적화 알고리즘을 이용한 수배송 계획 수립 기능, 수립된 경로의 리포트 기능 등을 수행하는 운송계획 최적화 시스템을 개발하였다.

4.1 시스템 환경 및 사용 시나리오

시스템을 활용하여 운송계획을 수립하는 사용자 프로세스 시나리오를 순서도로 표현하면 <Figure 5>와 같다. 데이터 입력 부분에서는 고객 수요 등 계획에 필요한 데이터를 입력하며, 사용자 파라미터 설정에서는 목적 식의 종류 및 경로 제약 등의 사용자 결정 옵션을 설정한다. 이는 2절에서 살펴본 운송계획 문제의 형태를 결정하게 된다. 해 구하기에서는 탑재된 알고리즘을 호출하여 제약을 반영한 계획을 수립하며, 이 계획을 버전으로 저장할 수 있다. 구해진 해를 확인하고, 동일한 입력 정보에 대하여 제약 조건을 변경 또는 추가하거나 생성된 경로

를 수정하여 계획 수립을 반복할 수 있는 what-if 기능을 제공한다. 이러한 과정을 반복하여 현실적이고 최적인 해를 구할 수 있다.

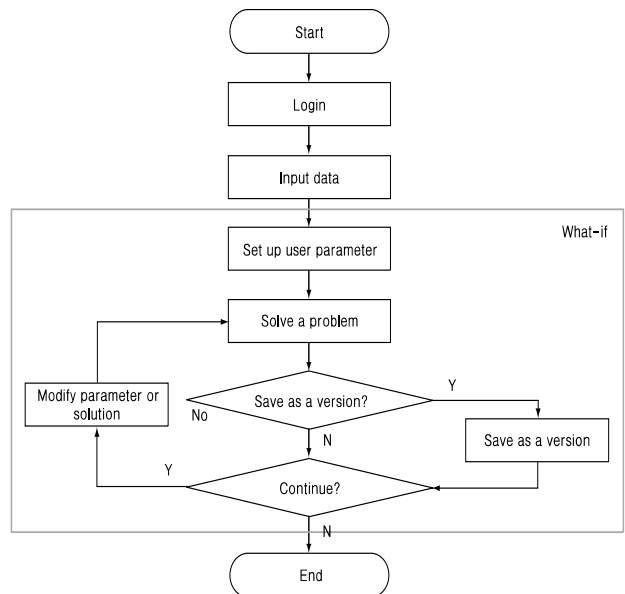


Figure 5. User scenario of the Routing and Scheduling System.

4.2 시스템 구조

<Figure 6>은 운송계획 최적화 시스템의 구조를 도식화한 것이다. 운송계획 최적화 시스템은 사용자 인터페이스 모듈 (User Interface Module, UIM), 조정 엔진(Coordination Engine), 계획 엔진(Planning Engine), DB 관리 모듈(DB Management Module)로

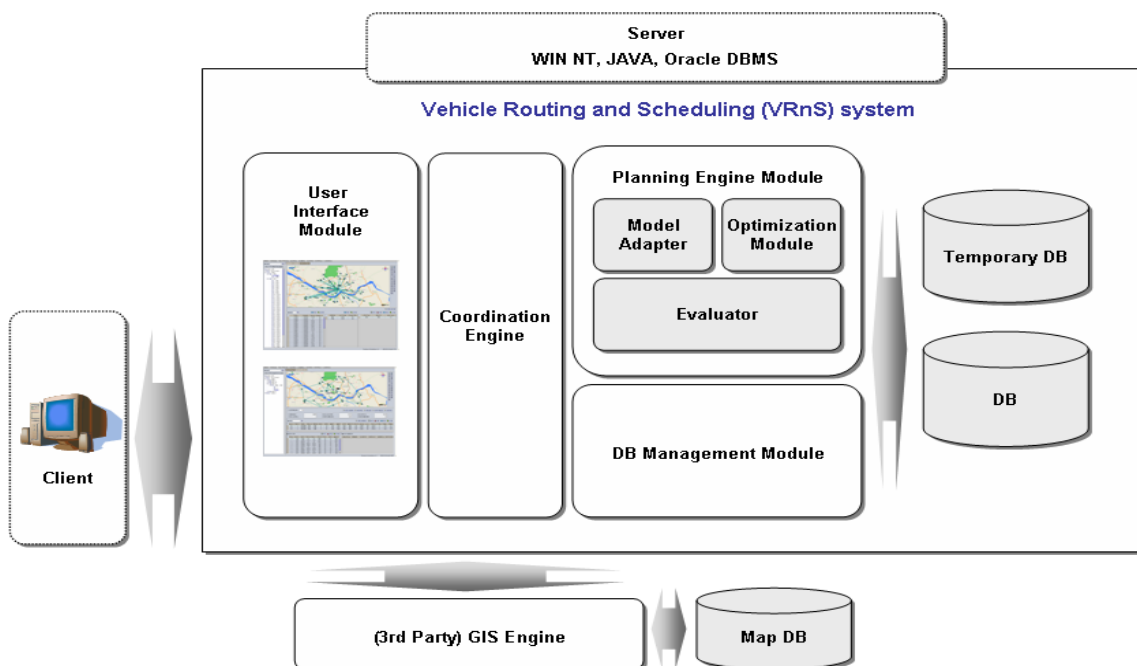


Figure 6. Structure of the Routing and Scheduling System.

이루어져 있다. 사용자 인터페이스 모듈은 사용자의 명령을 받고 시스템의 입력 정보 및 수행 결과를 사용자에게 보여주는 모듈로 DB 인터페이스 기능, 사용자 제약 인터페이스 기능, 리포트 기능을 수행하며, 조정 엔진은 모듈들 간의 인터페이스를 통해 전체 운송계획 프로세스에 걸쳐 시스템을 제어하는 모듈로 사용자 관리, DB 제어 기능, GIS 엔진 연동 기능, DB 연동 기능을 수행한다. 계획 엔진은 휴리스틱 알고리즘 및 최적화 알고리즘을 이용하여 운송계획 문제에 대한 해를 구성하고 평가

정보를 생성하는 모듈로, 알고리즘을 실행하기 전에 주어진 운송계획문제에의 전 처리를 위한 모델 어댑터(Model Adapter), 해를 구하기 위한 휴리스틱 알고리즘 및 최적화 알고리즘 모듈인 최적화 모듈(Optimization Module), 사용자 제약의 가능성(Feasibility) 체크 기능과 평가 기준에 의한 해 평가 및 리포트 정보를 생성하는 평가모듈(Evaluator)로 구성된다. DB 관리 모듈은 입력 자료, 시스템 생성 정보를 관리하는 모듈로 데이터 생성, 입력, 조회, 수정, 삭제 기능, DB 연동 기능을 수행한다.

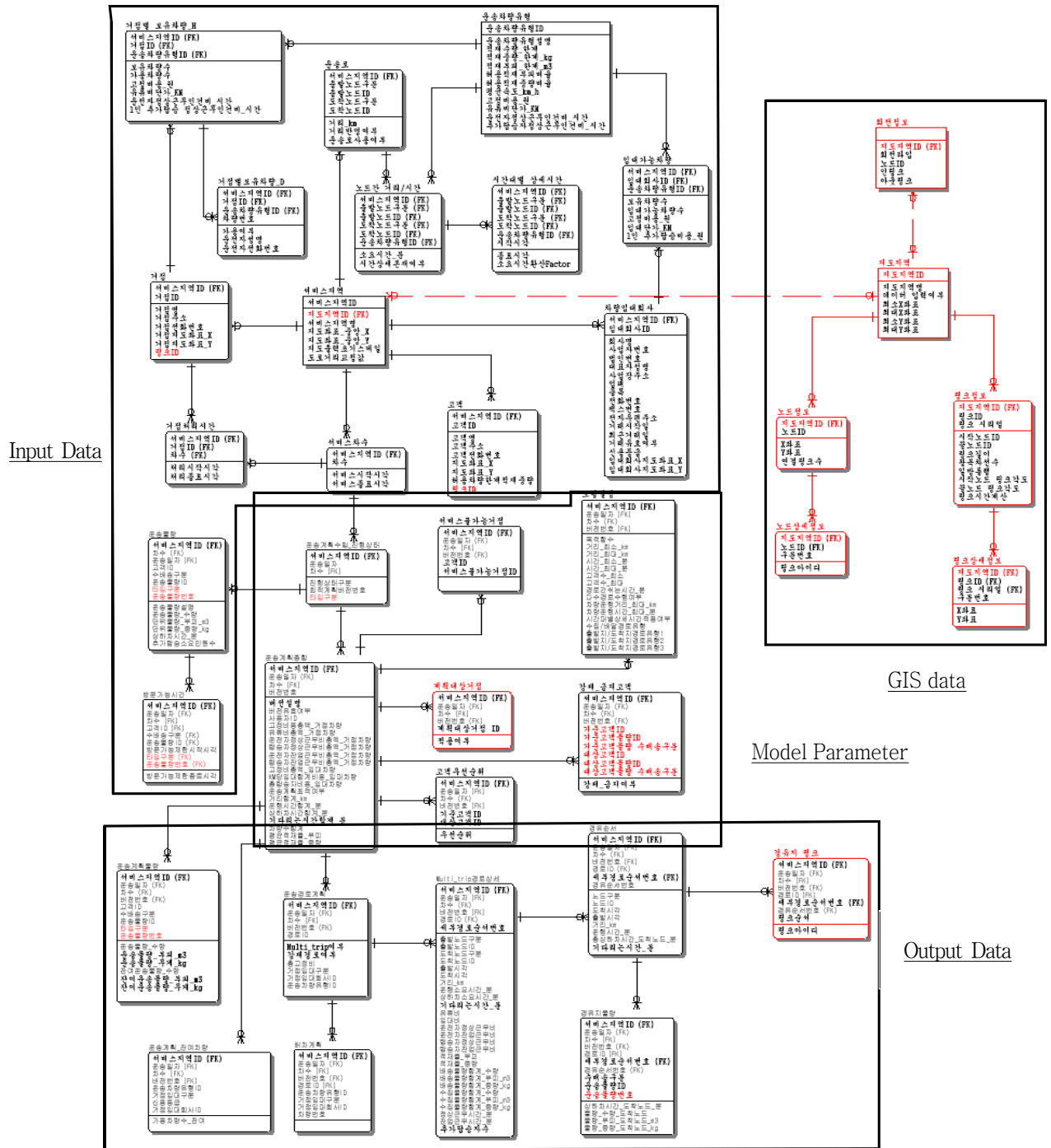


Figure 7. Data structure of the Routing and Scheduling System.

운송계획 최적화 시스템의 DB 구조는 <Figure 7>과 같다. 운송계획 최적화 시스템 DB는 기준 데이터, 거점/고객, 물량, 차량 등의 입력정보 관리 부분, GIS 데이터 관리를 위한 GIS정보 관리 부분, 운송계획 수립시 모형설정 데이터를 위한 모형 설정정보 관리 부분, 운송계획 수립 결과 데이터를 위한 출력 정보 관리 부분으로 구성되어 있다.

4.3 시스템 기능

운송계획 최적화 시스템의 기능은 거점, 고객, 차량, 물량 등의 기초 정보를 관리하는 기능과 실제 운송 계획을 수립하는 기능으로 나눌 수 있다. 기준정보 관리에서는 시스템 사용자가 관리하는 서비스 지역 및 차량 유형, 물량의 표준 정보 등의 정보를 관리하며, 거점 및 고객 정보에서는 거점의 위치와 용량, 고객들의 위치 정보와 거리 정보 등을 관리한다. 운송차량 정보에서는 거점 별 차량의 보유 정보를 관리하며, 물량 정보는 서비스 지역의 고객 별 일자별 물량 정보를 입력, 수정, 조회 할 수 있다. 운송 계획에서는 사용자의 옵션을 입력 받고, 정해진 서비스 지역의 특정 일자에 대한 운송 계획을 수립한다. 또한 그 결과를 확인하여 옵션의 수정 및 계획 재수립의 what-if 기능을 제공한다. 메뉴별 기능이 <Table 3>에 나타나 있다.

4.4 GIS 활용

운송계획 최적화 시스템은 현실적인 계획 수립 및 사용자의 편의를 위하여 GIS 정보를 활용하였다. 사용되는 GIS 정보는 지도 정보 및 도로 정보로 다음과 같이 활용되었다.

먼저, 거점 및 고객들 간의 현실적인 거리 반영을 위하여 활용되었다. 거점이나 고객의 위치를 알고 있더라도 그들 사이

의 거리의 계산이 현실적이지 못하다면, 계획된 경로의 현실성이 떨어지게 된다. 본 연구에서 개발된 최적화 시스템은 GIS의 도로 정보를 이용하여 거점이나 고객들 사이의 최단 거리를 실제 도로를 기반으로 계산하여 사용하였다. 이는 실제 도로 구간의 시작과 끝이 될 수 있는 교차로 등의 노드 정보와 노드들 사이의 도로의 유무를 포함하는 링크정보를 활용하여 계산하였다. 또한, 회전 금지, 일방통행 등의 정보를 추가하여 현실적인 거리 계산을 수행하였다. 이와 같이 계획수립의 중요한 기본 데이터인 거점 및 고객 간 거리를 실제 도로 정보를 통하여 계산함으로써 현실적인 경로 계획의 수립을 기대할 수 있다. 거리의 계산뿐 아니라, GIS 지도 및 도로 정보를 통하여 구해진 경로를 실제 지도상의 도로를 따라 표시할 수 있다. 실제 도로 위에 경로를 표시함으로써 사용자는 주어진 경로가 타당한 경로 인지 확인을 할 수 있다.

4.5 구현

운송계획 최적화 시스템은 운영체제 Windows 2000 이상, Oracle DBMS 8i, WebLogic 6.x이상 서버 환경에서 프로그래밍 언어로 JAVA(Swing, EJB)를 사용하였다. 클라이언트 환경은 운영체제 Windows 98 이상, JRE 1.2.x이상이다.

아래 그림은 구현된 운송계획 최적화 시스템의 사용자 화면의 일부를 보여주고 있다. <Figure 8>은 거점 정보, 거리/시간 정보, 운송차량 정보 및 운송물량 정보를 관리하는 화면이다. <Figure 9>는 운송계획 수립을 위해 모형 설정 및 정합성 설정을 하는 화면이며, <Figure 10>은 운송계획 수립 알고리즘을 이용해 생성된 운송계획을 보여주는 화면으로 GIS 데이터를 이용하여 실제 도로 정보에 기반을 둔 운송경로가 지도 위에 표시되어 있다.

Table 3. Function of the Routing and Scheduling System

Menu		Function
Base information	Service area	Management of service area information
	Vehicle type	Management of vehicle type
	Demand standard	Management of demand standard
Depot/Customer	Depot	Management of base information and service time of depot
	Customer	Management of base information of customer
	Distance/time	Generation and management of distance and time data classified by vehicle type and time slot
Vehicle	Vehicle of depot	Management of vehicle information of depot
	Leased vehicle	Management of leased vehicle
Demand	Demand	Management of base information and time windows of demand
	Demand inquiry	Inquiry of base information and time windows of demand
Route plan	Generation of route plan	Generation of route plans and management of route plans
	Decision of best route plan	Management of best route plan
System management	User information	Management of base information of user
	Private information	Management of private information of user

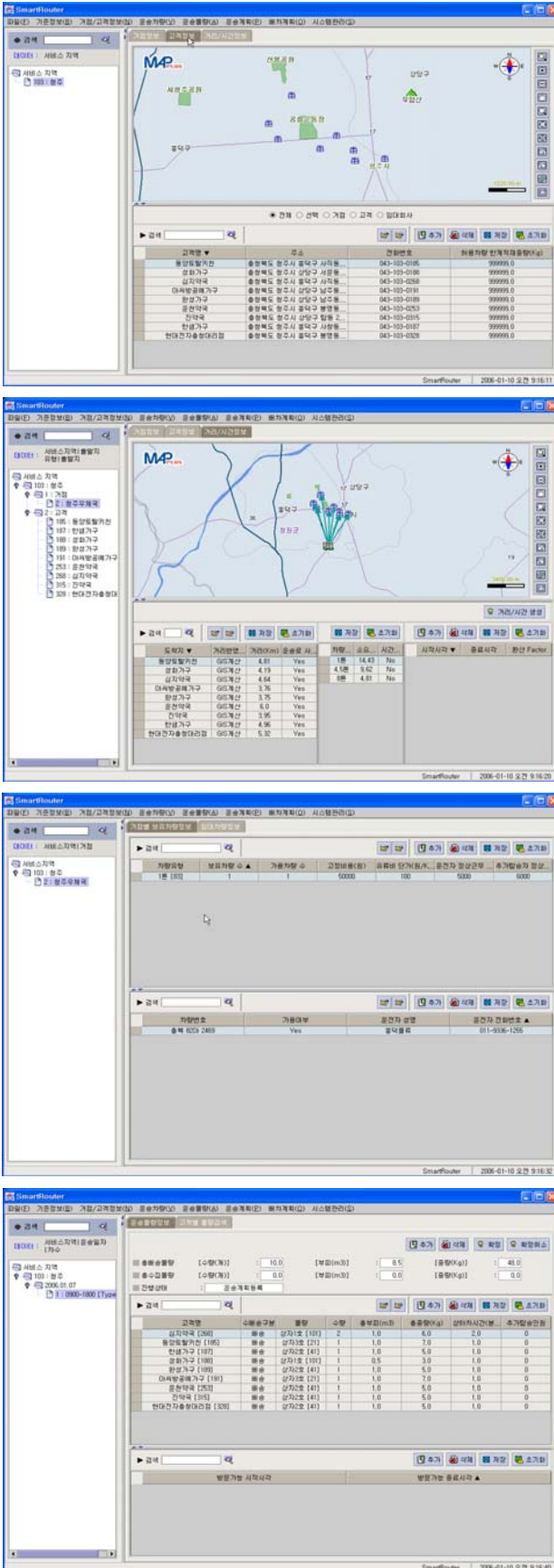


Figure 8. Input data management.

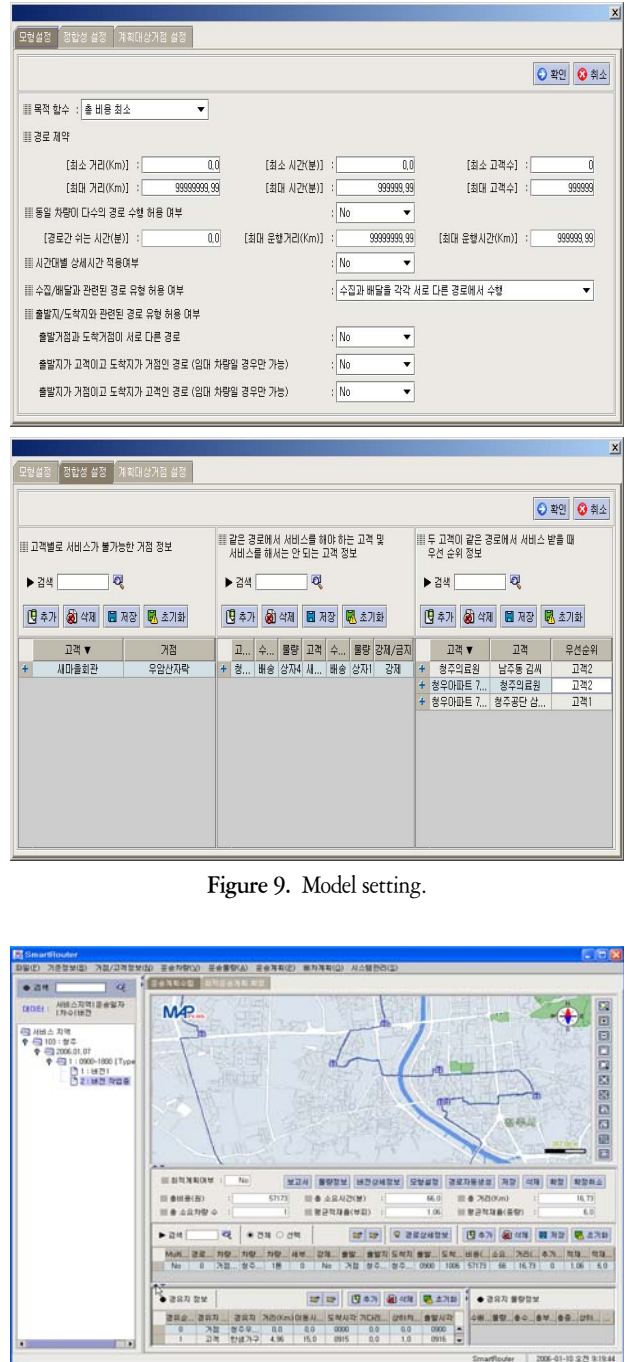


Figure 9. Model setting.

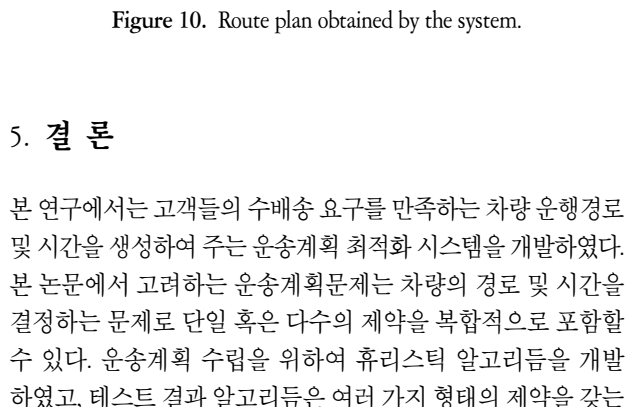


Figure 10. Route plan obtained by the system.

5. 결론

본 연구에서는 고객들의 수배송 요구를 만족하는 차량 운행경로 및 시간을 생성하여 주는 운송계획 최적화 시스템을 개발하였다. 본 논문에서 고려하는 운송계획문제는 차량의 경로 및 시간을 결정하는 문제로 단일 혹은 다수의 제약을 복합적으로 포함할 수 있다. 운송계획 수립을 위하여 휴리스틱 알고리즘을 개발하였고, 테스트 결과 알고리즘은 여러 가지 형태의 제약을 갖는

문제들에 대하여 전반적으로 좋은 해를 제공하는 것을 확인할 수 있었다. 개발된 알고리즘은 운송계획 시스템의 운송계획 엔진으로 탑재하였다. 운송계획 시스템은 알고리즘을 이용하여 계획을 수립하고, 계획 수립 결과를 확인하고, 사용자가 추가적인 제약을 가하여 새로운 계획을 수립하는 과정을 반복할 수 있는 what-if 기능을 제공한다.

참고문헌

- Brandao, J. and Mercer, A.(1998), The multi-trip vehicle routing and problem. *Journal of the Operational Research Society*, 49, 799-805.
- Cao, B., Sun, M., and Macleod, C.(1999), Applying GIS and combinatorial optimization to fiber deployment plans. *Journal of Heuristics*, 5, 385-402.
- Chao, I. M., Golden, B. L., and Wasil, E. A.(1993), A new heuristic for the multi-depot vehicle routing problem that improves upon best-known solutions. *American Journal of Mathematical and Management Science*, 13, 371-406.
- Christofides, N. and Eilon, S.(1969), An algorithm for the vehicle-dispatching problem. *Operations Research*, 20, 309-318.
- Christofides, N., Mingozzi, A., and Toth, P.(1979), The vehicle routing problem. In: Christofides, N., Mingozzi, A., Toth, P., and Sandi, C. (Eds.), *Combinatorial Optimization*, Wiley, Chichester.
- 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, 346-354.
- Clarke, G. and Wright, J. W.(1964), Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations Research*, 12, 568-581.
- Cordeau, J. -F., Gendreau, M., and Laporte, G.(1997), A tabu search heuristic for periodic and multi-depot vehicle routing problems. *Networks*, 30, 105-119.
- Derekenaris, G., Garofalakis, J., Makris, C., Prentzas, J., Sioutas, S., and Tsakalidis, A.(2001), Integrating GIS, GPS and GSM technologies for the effective management of ambulances. *Computers, Environment and Urban Systems*, 25, 267-278.
- Goetschalckx, M. and Jacobs-Blecha, C.(1989), The vehicle routing problem with backhauls. *European Journal of Operational Research*, 42, 39-51.
- Hong S-C. and Park Y-B.(2004), A Two-phase Method for the Vehicle Routing Problems with Time Windows, *IE Interfaces*, 17, 103-110.
- Jeon, D.(2002), A heuristic algorithm for the vehicle routing problem with time-dependent travel time. MS thesis, Daejeon, KAIST.
- Kim Y-H., Jang Y-S., and Ryu H-J.(2002), A Study on Developing Vehicle Scheduling System using Constraint Programming and Metaheuristics, *Proceedings of the IE & MS 2002 Conference*, 979-986
- Martello, S. and Toth, P.(1990), *Knapsack Problems*. Wiley, Chichester.
- Mosheiov, G.(1998), Vehicle routing with pick-up and delivery: tour-partitioning heuristics. *Computers and Industrial Engineering*, 34, 669-684.
- Nanry, W. P. and Barnes, J. W.(2000), Solving the pickup and delivery problem with time windows using reactive tabu search. *Transportation Research Part B-Methodological*, 34, 107-121.
- Osman, I. H.(1993), Metastrategy simulated annealing and tabu search algorithms for the vehicle routing problem. *Annals of Operations Research*, 41, 421-451.
- Renaud, J., Boctor, F. F., and Laporte, G.(1996), An improved petalheuristic for the vehicle routing problem. *Journal of the Operational Research Society*, 47, 329-336.
- Renaud, J., Laporte, G., and Boctor, F. F.(1996), A tabu search heuristic for the multi-depot vehicle routing problem. *Computers and Operations Research*, 23, 229-235.
- Solomon, M. M.(1987), Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints. *Operations Research*, 35, 254-265.
- Taillard, E. D., Laporte, G. and Gendreau, M.(1996), Vehicle routing with multiple use of vehicles. *Journal of the Operational Research Society*, 47, 1065-1070.
- Thangiah, S. R., Potvin, J. Y., and Sun. T.(1996), Heuristic approaches to vehicle routing with backhauls and time windows. *Computers and Operations Research*, 23, 1043-1057.
- Toth, P. and Vigo, D.(1999), A heuristic algorithm for the symmetric and asymmetric vehicle routing problems with backhauls. *European Journal of Operational Research*, 113, 528-543.
- Toth, P. and Vigo, D.(2003), The Granular Tabu Search and Its Application to the Vehicle-Routing Problem. *INFORMS journal on computing*, 15, 333-346.



최지영

고려대학교 산업공학과 학사
한국과학기술원 산업공학과 석사
현재 : 한국전자통신연구원 물류기술연구팀 연구원
관심분야 : SCM, 최적화



임재민

고려대학교 산업공학과 학사
고려대학교 산업공학과 석사
현재 : 한국전자통신연구원 물류기술연구팀 연구원
관심분야 : SCM, 시뮬레이션



이태한

연세대학교 응용통계학과 학사
한국과학기술원 산업공학과 석사
한국과학기술원 산업공학과 박사
현재 : 전북대학교 산업정보시스템공학과 전임강사
관심분야 : 정수계획법, 조합최적화