

고객의 납기마감시간이 존재하는 이기종 차량경로문제의 발견적 해법[‡]

강충상* · 이준수**

* 하이트맥주(주)

** 전북대학교 산업정보시스템공학과 대학원

A Heuristic for Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem with Time Deadline[‡]

Chung-Sang Kang* · Jun-Su Lee**

* THE HITE CO., LTD.

** Dept. of Industrial information & system Eng., Chonbuk National University

This paper dealt with a kind of heterogeneous vehicle routing problem with known demand and time deadline of customers. The customers are supposed to have one of tight deadline and loose deadline. The demand of customers with tight deadline must be fulfilled in the deadline. However, the late delivery is allowed to customers with loose deadline. That is, the paper suggests a model to minimize total acquisition cost, total travel distance and total violation time for a fleet size and mix vehicle routing problem with time deadline, and proposes a heuristic algorithm for the model.

The proposed algorithm consists of two phases, i.e. generation of an initial solution and improvement of the current solution. An initial solution is generated based on a modified insertion heuristic and iterative improvement procedure is accomplished using neighborhood generation methods such as swap and reallocation. The proposed algorithm is evaluated using a well known numerical example.

Keywords : Heterogeneous Vehicle Routing Problem, Heuristic Method, Guided Local Search

1. 서 론

물류는 기업과 고객 그리고 기업과 공급자를 연결시켜 주는 능력으로 정의될 수 있는데 현대 산업사회에 있어서 물류가 차지하는 위치는 생산의 중요성을 넘어 기업 경쟁력의 척도가 되고 있다. 이러한 환경 하에서 전체 물류비의 $\frac{1}{3} \sim \frac{2}{3}$ 정도를 차지하는 수송비의 절감은 소비자와 물류 운송회사, 공급자 등으로 이루어지는 공급사슬(Supply Chain)의 전체 운영비용의 절감으로 이어진다. 또한 배송의 정확성과 신속성은 정보화 사회에

서 기업의 경쟁력과 비용절감 뿐만이 아니라 제품 자체의 가치를 결정짓는 매우 중요한 역할을 하게 된다.

전통적인 차량경로문제(Vehicle Routing Problem, VRP)는 공급지(Depot)에 용량이 같은 차량이 여러 대 있고, 이들 차량들로 하여금 알려진 수요와 위치를 가지고 있는 고객들을 1번씩만 방문하면서 각 고객의 수요량을 충족시킨 후 공급지로 복귀하는데 필요한 최소차량의 수와 차량의 경로를 구하는 문제이다. 따라서 지리적으로 분산된 고객에게 재화와 서비스를 효율적으로 수·배송하는 차량 할당 및 복잡한 운행경로 등의 다양한 현실적 문제에 적용되기 위해서는 기본적인 VRP의 제

[‡] 본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 연구결과로 수행되었음.

<표 1> FSMVRP관련 기존연구

참 고 문 헌	차 량	공급지	고객납기제약	해 법
Desrochers (1991)	다른 적재용량 다른 운영시간	단일	없음	Matching Based Savings Algorithms
Salhi & Rand (1993)	다른 적재용량 다른 변동비	단일	없음	Heuristic 반복적 개선기법
Dullaert. et. al. (2002)	다른 적재용량	단일	상한과 하한	Insertion Heuristic
Stefan Irnich (2000)	다른 적재용량	다수	상한과 하한	set partitioning /covering method
Thangiah et. al.(1995)	동일한 적재용량	단일	상한	Heuristic
Solomon(1987)	동일한 적재용량	단일	상한과 하한	Insertion Heuristic
Lau. et. al.(2003)	제한된 차량대수 동일한 적재용량	단일	상한과 하한	Tabu Search
본 연구	다른 적재용량 운영시간 제한	단일	상한 (Tight&Loose)	Insertion Heuristic 반복적 개선 기법

약 외에 해당 수송·배송 시스템에 적합한 제약들이 추가되어야 한다. VRP는 외판원문제(Travelling salesman Problem, TSP)의 확장된 개념인데 Danzig & Ramer(1959)가 최초로 제안한 것으로 NP-hard 문제로 알려져 있으며 OR의 한 분야로써 폭 넓은 연구가 진행되고 있다. 시간 제약이 존재하는 VRP(VRP with Time Window, VRPTW)는 현실적으로 사용 될 수 있는 기본적인 수·배송 시스템이다. 지금까지 고려되는 VRPTW의 해법으로는 경로형성 발견 기법, 경로개선 발견기법, 메타휴리스틱 등이 있다. VRPTW의 다양한 경로형성 발견기법은 Solomon(1987), Potvin & Rousseau(1993)과 Bramel & Simchi-Levi(1996) 등에 의해서 제안되었다. 이기종 차량경로문제는 FSMVRP (Fleet Size and Mix VRP)라고도 하는데, 각기 다른 용량을 가진 차량들은 각기 다른 고정비와 변동비가 발생한다고 간주하고, 문제 제약을 만족하면서 경로의 이동비용(변동비)과 차량구입비(고정비)를 최소화하는 최적의 차량조합을 구하는 문제이다. Gould(1969)는 FSMVRP를 해결하기위한 선형계획모형을 개발하였고 Woods & Harris(1979)는 시뮬레이션 접근을 통해 문제를 해결하였으며 Etezadi & Beasley(1983)은 차량들이 될 수록 많은 고객들을 방문할 수 있도록 하는 공식을 개발했다. <표 1>은 FSMVRP의 관련연구들을 정리하였다. FSMVRP는 실생활에서 많이 사용될 수 있는 중요성에도 불구하고 많은 연구가 이루어지지 않았다(Jacques, 2002). 따라서 본 연구에서는 실제 수·배송 환경에 부합되도록 납기시간 외에 차량의 종류에 따른 구입비를 추가적으로 고려하여 실제 물류환경에 더욱 적합한 고

객의 납기를 갖는 FSMVRP에 대한 해법을 제시하고자 한다. 먼저 Solomon(1987)의 연속 삽입기법을 이용하여 제약조건을 만족하는 초기해를 구하고 초기해를 개선하는 방법으로 제안한 반복적 개선기법을 이용한 국부탐색알고리즘을 소개한다. 마지막으로 실험을 통해 최적성을 비교, 분석한다.

본 논문의 구성은 2절에서는 본 연구의 문제를 정의하고 수리적 모형을 세운 후 문제의 특성에 맞는 제약 조건 등을 제시하고 3절에서는 이웃해 생성방법을 소개하고, 제안한 알고리즘에 대한 절차를 소개한다. 4절에서는 실험의 결과를 분석하고 결론을 제시한다.

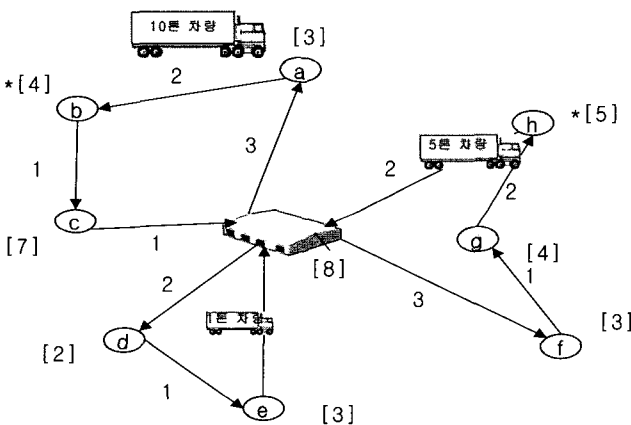
2. 납기를 갖는 FSMVRP

2.1 문제정의

전통적인 차량경로문제(VRP)는 각 배송지역의 시간제약이 반영되지 않고 차량의 적재용량은 모두 동일하다고 가정한다. 그러나 실제 물류배송환경에서는 화물차량의 운송시간이 제한되어 있고 제품 주문이 들어오면 각 배송지역마다 고객들이 원하는 납기가능시간이 주어지는 것이 일반적이다. Tangiah(1995)는 고객의 납기를 갖는 차량경로문제(Vehicle Routing Problem with Time deadlines, VRPTD)에서 전통적인 차량경로문제에 납기시간을 추가하여 납기시간 안에 서비스가 도착해야 함을 원칙으로 하지만 본 연구에서는 납기시간의 제약을 어기는 것을

허용하고 납기위반시간을 최소화하는 것으로 문제를 정의하였다. 일반적으로 차량경로문제는 1일을 기준으로 차량을 배차하는 문제이므로 실제 환경에서 고객이 특성에 따라서 납기의 지연이 고객의 서비스에 영향을 미치지 않는 경우가 있다. 따라서 모든 고객의 납기를 반드시 지켜야 하는 제약이 오히려 이동거리나 차량구입비용을 증가시켜 전체 비용의 지나친 낭비요인으로 작용할 수도 있다. 이에 본 연구에서는 고객의 납기시간을 위반을 허용하는 Loose Deadline과 위반을 허용하지 않는 Tight Deadline으로 정의 하였다. 본 연구에서 다루는 문제는 다음과 같이 정의할 수 있다.

- 1) 한대의 차량이 공급지를 출발하여 각 고객들을 방문함에 있어서 복수방문은 허용하지 않고 한 경로만을 서비스한다.
- 2) 복수차량에 의한 고객방문은 허용하지 않는다.
- 3) 각 경로의 출발시간은 0이다.
- 4) 서비스하는 고객들에 의한 총 수요는 차량의 적재용량을 초과하지 않는다.
- 5) 차량의 총 이동시간은 차량 종류별로 다르게 적용할 수 있지만 본 연구에서는 공급지의 시간제약과 동일하다고 가정했다.
- 6) 차량의 거리 당 비용은 차량의 종류에 상관없이 동일하다.
- 7) 모든 고객은 각각의 납기시간과 화물을 하역하는데 필요한 하역시간을 가지고 있다.
- 8) 각 고객의 수요는 적재용량이 가장 큰 차량의 적재용량을 초과하지 않는다.



(* : 납기위반을 허용하는 고객)

<그림 1> 납기를 갖는 FSMVRP의 예

<그림 1>은 납기를 갖는 이기종 차량경로문제를 그림으로 표현한 것이다. <그림 1>에서 살펴볼 때 각 차량들

은 경로마다 다른 적재용량을 가진 차량들이 할당될 수 있고 각 고객은 납기시간을 갖는다. <그림 1>에서 고객 'e'의 우측에 [3]으로 표시된 것은 납기시간을 표현한 것이다. <그림 1>에서 차량이 'd' 고객에 도착하면 차량의 이동시간은 2가 되고 'e' 고객에 도착하면 차량의 이동시간은 3이 된다. 'd' 고객의 하역시간을 무시한다면 납기시간인 3을 만족하게 된다. 고객 'b'의 납기시간은 4로 정의되어 있는데 'b' 고객에 차량이 도착하는 시간은 5가 되어 고객의 납기시간을 위반하게 된다.

<표 2> 문제 정의

구분	내용	비고
공급지	· Single Depot · Deadline이 존재	· 공급지에 차고가 있다고 가정
고객	· 수요는 Node에서만 발생 · 각각의 time deadline과 unloading time 존재 · 복수차량 방문 허용 안함	· time deadline을 꼭 만족해야 하는 고객과 위반을 허용하는 고객으로 분리
차량	· Heterogeneous(Multiple Vehicle Type) · 차량의 수는 무한대 · 동일한 시간제약 (최대운행시간) · 킬로화물이 존재하지 않음	· 각기 다른 용량을 가진 차량들은 각기 다른 고정비 발생

본 연구에서는 각 고객의 납기를 반드시 준수해야 하는 고객과 납기의 위반을 허용하는 고객으로 분류했고 *로 표시되어 있는 고객은 납기위반을 허용하는 고객을 의미한다. 또한 <그림 1>에는 표현되어 있지 않지만 각 고객은 화물을 하역하는데 소요되는 하역시간을 가지고 있다. <표 2>에서는 납기를 갖는 차량경로문제의 특성을 공급지와 고객, 차량에 따라 분리해서 정리하였다.

2.2 수리모형

본 연구에서는 전통적인 차량경로문제의 모형에 이기종 차량과 두 가지 유형의 납기에 대한 부분을 추가하여 모형을 구성하였으며 목적함수를 차량 이동시간과 납기마감시간 위반, 차량구입비를 최소화하는 모형으로 구분하여 정의하였다.

i : 고객 index $i=1,2,\dots,N$, $i=0$ 일 경우 중앙창고 (공급지)

k : 차량 type index $k=1,\dots,K$

d_{ij} : 고객 i 에서 j 로의 이동거리

t_{ij} : 고객 i 에서 j 로의 이동시간

- q_i : 고객 i 의 알려진 수요량
- tl_i : 납기시간 위반을 허용하지 않는 고객 i 의 납기
- sl_i : 납기시간의 위반을 허용하는 고객 i 의 납기
- s_i : 고객 i 의 service time으로 하역시간으로 정의
- b_j : 고객 j 의 작업시작시간 $b_i + s_i + t_{ij}$
- V_i : 고객 i 의 납기 위반 시간 $\max\{0, b_i - sl_i\}$
- f_k : 종류가 k 인 차량의 획득비 ($f_1 < f_2 < \dots < f_k$)
- Q_k : 종류가 k 인 차량의 적재용량 ($Q_1 < Q_2 < \dots < Q_k$)
- r_k : 종류가 k 인 차량의 최대 이동시간
- a : 목적함수의 가중치 $0 < a < 1$

$$\begin{aligned} \text{Min} \{ & a_1 \cdot \text{Min} [\sum_{k=1}^K \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N (d_{ij}) X_{ijk}] + \\ & a_2 \cdot \text{Min} [\sum_{i=1}^N \text{Max}\{0, b_i - sl_i\}] + \\ & a_3 \cdot \text{Min} [\sum_{k=1}^K f_k \sum_{j=1}^N X_{0jk}] \} \end{aligned} \quad (1)$$

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

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

$$\sum_{i=0}^N X_{ijk} - \sum_{i=0}^N X_{jik} = 0 \quad j = 1, \dots, N \quad k = 1, \dots, K \quad (4)$$

$$\sum_{i=0}^N Y_{ij} - \sum_{i=0}^N Y_{ji} = Q_j \quad j = 0, 1, \dots, N \quad (5)$$

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

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

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

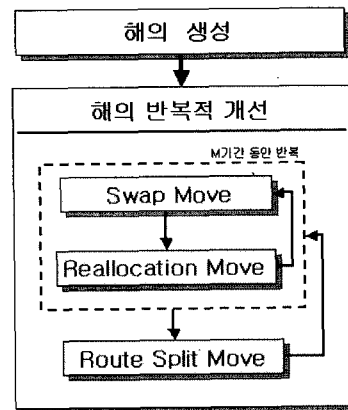
$$\sum_{i=0}^N \sum_{j=0, j \neq i}^N X_{ijk} (t_{ij} + s_i) \leq r_k \quad \forall k \in [0, K] \quad (9)$$

$$X_{ijk} \in [0, 1], \quad Y_{ij} \geq 0, \quad Y_{ii} = 0, \quad b_i \leq tl_i \quad (10)$$

$i = 0, \dots, N, \quad j = 0, \dots, N, \quad k = 1, \dots, K$

혼합정수계획(Mixed Integer Programming)문제로서 결정변수 X_{ijk} 는 차량종류 k 로 지점 i, j 를 이동했을 때 1, 그렇지 않으면 0을 나타내며 결정변수 Y_{ij} 는 지점 i 에서 j 로의 운송량을 나타낸다. 식(1)은 목적함수를 의미하는데 첫 번째 식은 두 지점 i, j 간의 운행거리의 총합을 두 번째 목적식은 납기위반시간의 총합, 세 번째 식은 차량의 획득비의 총합을 최소화하는 것을 나타내는 것이다. 식(2), (3)은 각 고객에게는 1대의 차량으로 1번만 방문한다는 것을 의미하며 식(4)는 차량이 한 수요 지점에 도착한 뒤에는 반드시 떠나야 한다는 것을 의미

한다. 식(5)는 각 고객에게는 요구한 수요량만큼만 배달 한다는 것을 의미하고 식(6)은 공급지에는 반드시 빈차로 귀환함을 의미한다. 식(7)은 공급지에서 싣고 떠나는 총 공급량(배달량)은 고객들의 총 수요량과 일치함을 뜻한다. 식(8)은 두 지점사이에 이동되는 운송량은 그 경로에 사용되어지는 차량의 최대용량을 초과할 수 없다는 것을 의미한다. 식(9)는 한 경로의 총 이동시간은 차량의 최대이동가능시간을 초과할 수 없다는 것을 의미한다. 식(10)은 납기 위반을 허용하지 않는 고객은 납기마감시간 전에 도착해야 함을 의미한다.



<그림 2>알고리즘 개요

3. 발견적 기법

본 절에서는 납기가 있는 FSMVRP의 해법을 제시하고자 한다. 제안하는 알고리즘은 연속삽입기법에 의한 발견적 기법을 통해 제약조건을 만족하는 초기해를 생성하고, 제안하는 몇 가지 이웃해 생성방법과 반복적 개선기법을 이용해 해를 개선시킨다. <그림 2>는 본 연구에서 적용한 알고리즘을 간단하게 표현한 그림으로 크게 문제의 제약을 만족하면서 초기해를 생성하는 과정과 생성된 해의 개선을 위하여 이웃해 생성기법을 이용하여 반복적으로 해를 개선하는 과정의 두 부분으로 구분한다. 첫 번째 해의 생성과정은 문제의 제약을 만족하면서 초기해를 생성하는 과정이고 두 번째는 생성된 해의 개선을 위하여 이웃해 생성기법을 이용하여 반복적으로 해를 개선하는 과정이다.

3.1 납기를 갖는 FSMVRP의 연속삽입기법

본 연구에서 제안한 연속적인 경로형성 기법은 solomon (1987)의 삽입기법과 유사하다. 현재까지의 부분경로에서

두 개의 인접한 고객 i, j 에 새로운 고객 u 를 삽입할 때 마다 $c_1(i, u, j), c_2(i, u, j)$ 의 두 가지 기준을 사용한다.

단계1 - 초기화 : 첫 번째 고객은 아직 경로에 포함되지 않은 고객 중에서 공급지에서 가장 먼 고객을 선택한다.

단계2 - 고객을 경로에 삽입 : 현재까지의 경로인 $i_0 = i_m = i_0 (i_0, i_1, i_2, \dots, i_m)$ 에 각각의 삽입되지 않은 고객을 인접한 두 고객 i, j 사이에 삽입하여 제약조건을 만족하는 최적의 삽입 위치를 계산한다.

$$c_1(i(u), u, j(u)) = \min[c_1(i_{p-1}, u, i_p)], \dots (11)$$

여기서 $p=1, 2, \dots, m$. u 를 i_{p-1}, i_p 사이에 삽입할 경우 (i_p, \dots, i_m) 의 고객들이 서비스를 시작하는 시간은 변화할 것이므로 시간제약을 만족하는 고객만이 삽입이 가능하다. 다음으로 현재 경로상에 삽입될 최적의 고객 u 는 아래식에 의해서 결정된다.

$$c_2(i(u^*), u^*, j(u^*)) = \max [c_1(i(u), u, j(u))] \dots (12)$$

$c_{11}(i, u, j)$ 은 고객을 해당 경로에 삽입 후 증가된 이동거리를 의미하고 $c_{12}(i, u, j)$ 은 삽입 후 해당경로의 전체 납기 지연시간(TL_{after})과 삽입 전 전체 납기 지연시간($TL_{current}$)과의 차를 의미한다. $c_{13}(i, u, j)$ 에서 ACS는 Dullaert. et. al.(2002)이 제안한 삽입기준으로, 삽입 후 해당경로의 전체수요 Q^{new} 를 만족하는 적재용량을 가진 최소차량의 획득비 $F(Q^{new})$ 와 삽입 전 차량의 획득비 $F(Q)$ 의 차를 의미한다.

$$c_1(i(u), u, j(u)) = \min[c_1(i_{p-1}, u, i_p)], p=1, 2, \dots, m$$

$$c_1(i, u, j) = a_1c_{11}(i, u, j) + a_2c_{12}(i, u, j) + a_3c_{13}(i, u, j),$$

$$c_{11}(i, u, j) = d_{i,u} + d_{u,j} - \mu d_{i,j}, \mu \geq 0, \quad d_{ij} = i \text{와 } j \text{ 사이 거리}$$

$$c_{12}(i, u, j) = TL_{after} - TL_{current}$$

$$c_{13}(i, u, j) = ACS, \quad ACS = F(Q^{new}) - F(Q)$$

삽입할 고객 선택 기준은 아래 식과 같다.

$$c_2(i(u), u^*, j(u)) = \max U [c_2(i, u, j)],$$

U : un-routed and feasible

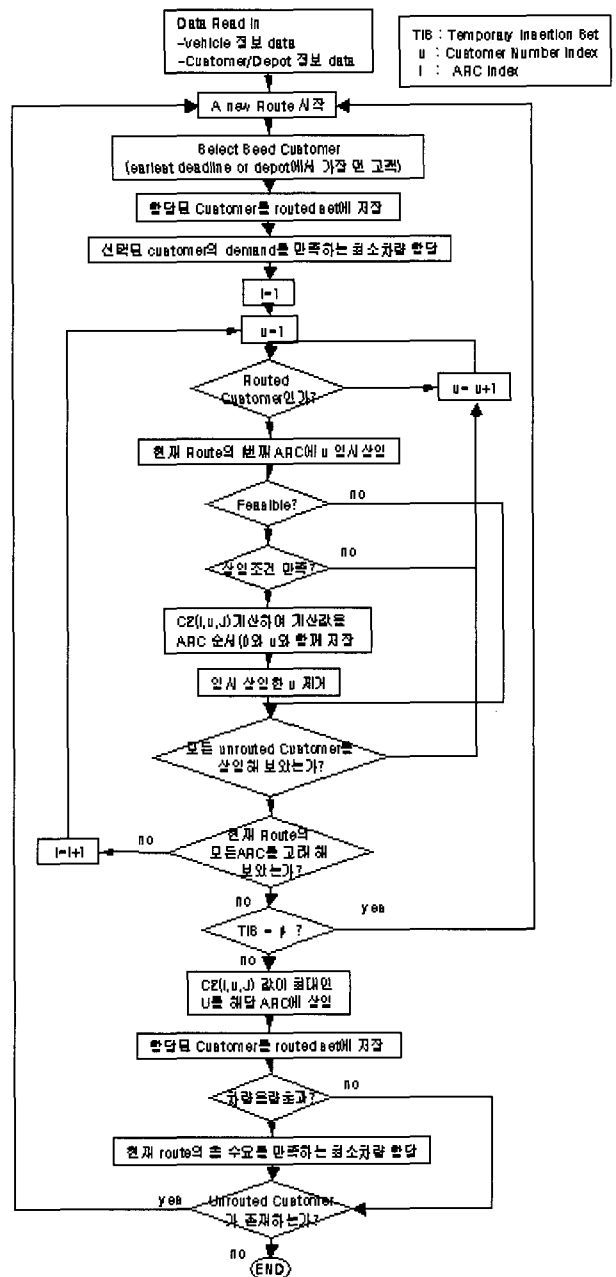
$$c_2(i, u, j) = \lambda_u(d_{0u} + t_{0u}) + F(q_u) - c_1(i, u, j), \lambda > 0,$$

d_{0u} : 공급지와 u 사이의 거리

t_{0u} : 공급지와 u 사이의 이동시간

$F(q_u) = q_u$ 를 만족하는 최소차량의 획득비용

단계3 - 새로운 경로 생성 : 시간제약과 차량용량제약을 만족하는 고객이 더 이상 존재하지 않을 경우 하나의 새로운 경로를 시작한다. <그림 3>은 본 연구의 삽입기법의 절차를 흐름도로 표현한 것이다.



<그림 3> 연속삽입기법을 이용한 초기해 생성 흐름도

3.2 이웃해 생성방법

반복적 개선기법은 제약조건을 만족하는 이웃해의 집합을 탐색하여 해를 개선하고자 하는 방법이다. 본 연구에서 고려하는 이웃해 생성방법은 모두 3가지로 요약할 수 있다. 차량경로문제는 여러 대의 차량으로 경로가 구성되어 있기 때문에 TSP와는 달리 하나의 이웃해 생성 방법으로는 좋은 해를 찾기가 쉽지 않다. 따라서 여러 개의 이웃해 생성방법을 사용함으로써 보다 많은 이웃해를 탐색할 수 있게 되어 해가 국지(local optima)에 머무는 것을 방지할 수 있다.

3.2.1 경로간 교환이동

교환이동은 차량경로간 고객들을 교환하는 이웃해 생성방법으로 두 차량경로에서 각각 하나의 지점을 선택하여 상호 교환하는 방법이다. 즉, 두 차량경로에서 각각 하나의 지점을 제거하고 상호 교환한다. 교환이 가능하더라도 해당 목적함수 값의 개선이 있을 때만 이동이 가능하고 현재 경로에서 최고의 차량이용률을 가진 차량조합을 구하기 위하여 각 경로들에 할당된 차량보다 더 적재용량이 큰 차량이 할당되지는 못한다. 교환이동의 경우 해의 개선이 발생하면 무조건 이동하는 것은 아니고 선택된 고객과 교환이 가능한 모든 고객을 고려해서 목적함수 값의 절약정도가 가장 큰 고객과 교환을 한다.

3.2.2 경로간 삽입이동

삽입이동은 두 차량경로 간에 삽입이 이루어지는 이웃해 생성방법으로 한 차량경로에서 한 고객을 선택하여 제거한 후 다른 차량경로에 삽입하는 방법이다. 삽입이동의 과정에서도 교환이동의 과정과 마찬가지로 해당 목적함수의 값이 절약이 발생할 경우에만 이동이 가능하며 목적함수 값의 절약정도에 따라 내림차순으로 정렬한다. 그 중 절약정도가 가장 큰 ARC에 선택한 고객이 삽입된다.

3.2.3 경로 분리이동

경로 분리이동은 교환이동과 삽입이동을 통하여 현재 해를 개선시킨 후 더 이상 해의 개선이 없을 경우 또는 최대 반복수를 초과한 경우에 시행하는 이웃해 생성방법으로 고객들 간의 활발한 이동과 최적의 차량조합을 찾기 위하여 사용된다. 최소적재용량을 가진 차량이 할당된 경로를 제외하고 차량의 이용률이 가장 낮은 경로에 대하여 더 작은 적재용량을 가진 차량이 운행되도록 경로를 분리(절단)하는 이동이다.

3.3 제안한 알고리즘

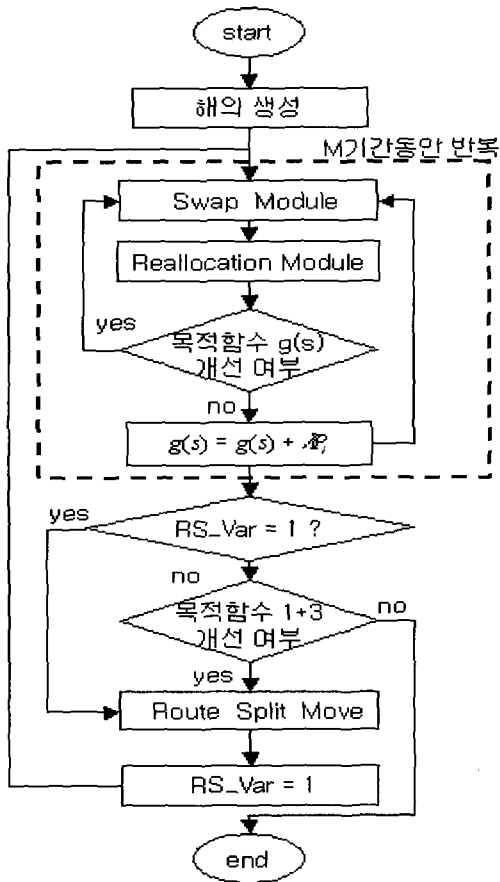
본 연구의 반복적 개선기법에서 사용하는 알고리즘은 Guided Local Search(GLS)를 응용하여 사용하였다. GLS는 탐색을 통해 얻어진 경험을 바탕으로 목적함수에 벌금(penalty)을 부여하는 것을 추가한 알고리즘이다. GLS는 조합최적화 문제를 위한 지능적인 탐색방법으로 국부 최적해를 반복적으로 탐색해나가는 방법이다. 본 연구에서는 Voudouris & Tsang(1995)의 목적함수 갱신방법을 본 연구에서 고려된 문제의 특성에 맞게 응용·사용하였다.

$$g(s) = g(s) + \lambda \cdot p_i, \quad p_i = M - i \quad \dots\dots\dots(13)$$

식(13)은 목적함수를 갱신하는 방법을 표현한 식으로 λ 는 벌금인자, M 은 반복수를 의미한다. 벌금벡터 p 는 국지탐색을 반복적으로 시행할 때 마다 갱신이 되며 각각의 국지탐색은 국부 최적해에 도달할 때까지 반복된다. i 는 현재의 반복수를 의미한다. 예비실험을 통해 벌금인자 λ 는 실험을 통해 0.01과 0.02사이에서 좋은 해를 찾았으므로 $\lambda=0.02$ 값을 사용하였다. 그리고 Voudouris & Tsang(1995)에서 정의한 것과는 다르게 p_i 에 대하여 $p_i = M - i$ 로 정의하였으며 반복수가 증가함에 따라 p_i 값을 낮춰줌으로써 p_i 가 점차 0에 수렴하도록 정의하였다. 교환모듈과 삽입모듈은 각 경로에 더 큰 차량이 할당되는 것을 허용하지 않고 차량의 이동거리와 납기 위반시간이 개선될 경우에만 이동을 허락한다. $g(s)$ 는 이동거리와 납기위반시간의 합을 의미한다.

M 기간동안 교환모듈과 삽입모듈을 반복하다 보면 상 목적함수 더이상 값이 개선되지 않는 상태에 도달하게 된다. 이때 현재의 경로에서 최적의 차량조합을 찾아가기 위하여 벌금함수 식(13)을 사용하여 이동의 기회를 늘려주고 최적의 차량조합과 차량의 이용률을 극대화시키는 경로들로 유도해나간다. <그림 4>는 제안한 알고리즘의 흐름도를 표현한 것으로 점선으로 표시된 부분이 현재까지의 절차를 설명한 것이다.

M 기간동안 반복(국지 탐색)이 종료되면 현재의 경로들에서 차량 적재용량의 이용률이 가장 낮은 경로를 선택해서 두개의 경로로 분리하고 삽입기법에 의해 각 경로의 차량에 고객들을 할당한다. 경로를 분리해서 새롭게 만든 경로는 임시 경로에 저장되어 M 기간동안 현재 경로를 개선하여 본 후 이전의 경로보다 해가 개선될 경우에만 현재 경로를 현재까지의 최고해로 갱신하고 그렇지 않을 경우는 경로를 분리하지 않았을 때의 경로를 현재까지의 최고해로 유지한다. 이러한 반복과정을 통해 해를 개선시켜나간다.



<그림 4>알고리즘의 흐름도

4. 실험 및 결과분석

본 절에서는 2절에서 살펴본 납기를 갖는 FSMVRP의 입력데이터를 정의하고 제안한 알고리즘을 실행하여 해를 도출하였다. 또한 제안한 알고리즘의 성능을 검증하기 위하여 납기를 갖는 FSMVRP와 유사한 Liu & Shen(1999)의 시간제약이 있는 FSMVRP에 본 연구의 알고리즘을 적용하여 해를 도출하고 비교하였다. 제안한 알고리즘을 구현하기 위해 MicroSoft사의 C++를 사용하였다.

4.1 납기를 갖는 FSMVRP에 적용

실험을 위한 입력정보는 고객정보와 차량정보로 나눌 수 있는데 고객정보는 고객의 위치를 표시하는 X좌표와 Y좌표, 수요량, 납기시간, 하역시간으로 구성되고 차량정보는 각 차량타입별 용량, 그리고 구입비로 이루어진

다. 차량에 관한 데이터는 <표 3>과 같이 정의하여 사용하였다.

<표 3> 차량정보

종 류	적재용량	구 입 비
A	100	500
B	200	900
C	300	1200

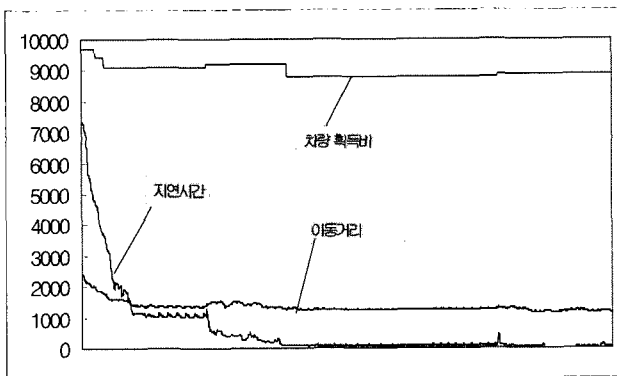
<표 4>고객의 정보

고객번호	X	Y	수요량	납기시간	하역시간
0(공급지)	40	50	0	1236	0
1	45	68	10	967	90
2	45	70	30	870	90
3	42	66	10	146	90
4	20	85	20	67	90
5	40	69	20	225	90
.
.
.
97	60	85	30	622	90
98	58	75	20	84	90
99	55	80	10	820	90
100	55	85	20	726	90
Tight Deadline Customer	3, 6, 12, 18, 21, 27, 30, 38, 42, 49, 52, 58, 62, 69, 71, 77, 81, 86, 90, 98				

고객과 공급지에 대한 정보는 문제의 조건을 만족시키기 위하여 100명의 고객정보를 가진 Solomon(1987)의 C101 데이터를 수정하여 사용하였다. <표 4>와 같이 공급지의 위치정보(X, Y)와 시간제약, 고객의 위치정보(X, Y)와 서비스시간은 그대로 사용하였으며 각 고객의 시간제약의 상한을 납기시간으로 설정하였다. 납기를 꼭 지켜야 하는 고객은 20개를 선택하여 사용하였다. <표 5>는 <표 3>과 <표 4>의 데이터를 이용하여 실험한 결과이다. w 는 목적함수의 가중치를 의미하는 것으로 첫 번째 목적식의 이동거리를 나타내는 목적함수와 두 번째 목적식의 납기위반시간의 합을 나타내는 목적함수에 적용된다. 첫 번째 목적식에는 가중치 w 를 두 번째 목적식에는 $1-w$ 의 가중치가 곱해지게 되는데 이는 목적함수의 가중치의 변화에 따른 결과를 보기 위함이다.

<표 5>납기를 갖는 FSMVRP의 실험결과

w	α_1	α_2	α_3	MC+A	MC	AC	LT	LN	NR
0.1	0.1	0.1	0.8	10545	1445	9100	468	9	11
0.3	0.1	0.1	0.8	10069	1369	8700	495	17	11
0.5	0.1	0.1	0.8	10138	938	9200	0	0	12
0.7	0.1	0.1	0.8	9865	1065	8800	155	4	12
0.9	0.1	0.1	0.8	9928	1228	8700	2542	19	11
0.1	0.1	0.8	0.1	10107	1207	8900	0	0	11
0.3	0.1	0.8	0.1	10228	1328	8900	0	0	13
0.5	0.1	0.8	0.1	10184	1284	8900	89	2	13
0.7	0.1	0.8	0.1	10115	1215	8900	167	3	13
0.9	0.1	0.8	0.1	10263	1263	9000	719	16	14
0.1	0.8	0.1	0.1	10214	1614	8600	1976	22	11
0.3	0.8	0.1	0.1	10387	1487	8900	3353	46	10
0.5	0.8	0.1	0.1	9949	1249	8700	1229	19	11
0.7	0.8	0.1	0.1	9931	1331	8600	3170	36	10
0.9	0.8	0.1	0.1	9955	1255	8700	2295	33	11
0.1	1/3	1/3	1/3	10408	1208	9200	0	0	12
0.3	1/3	1/3	1/3	10306	1406	8900	0	0	13
0.5	1/3	1/3	1/3	10608	1408	9200	28	6	12
0.7	1/3	1/3	1/3	10031	1131	8900	40	2	13
0.9	1/3	1/3	1/3	9885	1185	8700	4365	28	11



($w: 0.7, \alpha_1: \frac{1}{3}, \alpha_2: \frac{1}{3}, \alpha_3: \frac{1}{3}$)

<그림 5> 해의 개선 과정 도표

α_1 (이동거리를 고려한 삽입기준 매개변수), α_2 (납기위반 시간을 고려한 삽입기준 매개변수), α_3 (차량의 획득

비를 고려한 삽입기준 매개변수)는 초기해를 구하기 위해 삽입기법에 사용한 매개변수들이다. *MC*는 이동거리와 동일하게 산정한 이동비, *AC*는 차량의 획득비, *LT*는 지연시간, *LN*은 지연고객 수, *NR*은 전체 경로의 수를 의미한다. <표 5>의 실험결과를 통해 살펴볼 때 초기해와 목적함수의 가중치에 따라 결과 값이 변화됨을 알 수 있다. 특히 α_2 를 α_1 과 α_3 보다 크게 줄 경우 납기를 만족하는 비율이 더 크다. 또한 목적함수의 가중치 w 에 따라서 다른 결과 값이 도출되는 것을 볼 수 있는데 가중치 w 를 크게 줄 경우 이동비용(*MC*)에는 큰 영향을 주지는 않지만 지연시간(*LT*)에는 영향을 주어 가중치 w 가 증가할수록 지연시간도 동시에 증가됨을 알 수 있다. <그림 5>는 반복적 개선기법을 사용하여 해가 개선되는 과정을 그래프로 나타낸 것이다.

4.2 시간제약이 있는 FSMVRP에 적용

알고리즘의 성능을 검증하기 위하여 Liu & Shen(1999)의 시간제약이 있는 이기중 차량경로문제에 본 연구의 알고리즘을 적용하여 실험하였다. 초기해의 생성은 Dullaert 등(2002)의 ACS 알고리즘을 사용하였고 초기고객을 선택하는 기준은 시간제약의 하한이 가장 작은 고객을 선택하는 것으로 하였다. 데이터는 Liu & Shen(1999)의 논문에서 사용한 Solomon(1987)의 C101 고객 정보와 Liu & Shen(1999)의 C1A, C1B, C1C의 차량정보를 사용하였다.

<표 6>을 살펴볼 때 Liu & Shen(1999)의 해보다 우수(C1A, C1B의 경우)하거나 큰 차이를 보이지 않고 있는 것(C1C)을 알 수 있다. <표 7>, <표 8>, <표 9>는 <표 6>의 실험결과를 통해 얻은 방문순서를 표로 나타낸 것이다.

<표 6> Liu & Shen(1999)의 해와 비교

	C1A	C1B	C1C
$MCS_{-\lambda-n}$	8042	2803	1886
$MCS^*_{-\lambda-n}$	8007	2661	1749
$MOOS_{-\lambda-n}$	8515	2626	1870
$MOOS^*_{-\lambda-n}$	8295	2485	1705
$MROS_{-\lambda-n}$	8042	2803	1886
$MROS^*_{-\lambda-n}$	8007	2661	1749
제안알고리즘	7991	2378	1732

<표 7> C1A 데이터를 이용해 생성된 경로 해

경로	방 문 순 서	수요량	적재용량
1	0-5-3-7-8-10-11-9-4-0	100	100
2	0-20-24-25-27-29-30-26-0	100	100
3	0-67-65-63-62-74-72-61-64-68-66-69-0	200	200
4	0-43-42-41-40-44-46-45-0	100	100
5	0-90-87-86-83-82-84-89-0	100	100
6	0-98-96-95-94-92-93-97-100-99-1-0	200	200
7	0-57-55-54-53-56-58-60-59-0	200	200
8	0-13-17-18-19-15-16-14-12-91-0	200	200
9	0-32-33-31-35-0	100	100
10	0-81-78-76-71-70-73-77-79-80-75-47-0	180	200
11	0-37-38-39-36-34-0	100	100
12	0-28-6-23-22-21-49-0	100	100
13	0-85-88-2-52-0	100	100
14	0-48-51-50-0	30	100

<표 8> C1B 데이터를 이용해 생성된 경로 해

경로	방 문 순 서	수요량	적재용량
1	0-5-3-7-8-11-9-6-0	100	100
2	0-20-24-25-27-29-30-26-0	100	100
3	0-67-65-63-62-66-0	100	100
4	0-43-42-41-40-44-45-48-51-50-0	100	100
5	0-90-87-86-83-84-85-0	100	100
6	0-98-96-95-94-92-99-0	100	100
7	0-57-55-54-59-0	100	100
8	0-13-17-18-19-14-4-0	100	100
9	0-32-33-31-35-0	100	100
10	0-81-78-76-71-73-77-0	100	100
11	0-53-56-58-60-0	100	100
12	0-10-28-23-2-1-75-0	100	100
13	0-74-72-61-64-68-69-0	100	100
14	0-82-88-89-91-21-47-0	100	100
15	0-15-16-12-0	100	100
16	0-37-38-39-36-34-0	100	100
17	0-70-97-79-80-52-49-0	100	100
18	0-46-100-22-0	70	100
19	0-93-0	40	100

<표 9> C1C 데이터를 이용해 생성된 경로 해

경로	방문 순서	수요량	적재용량
1	0-5-3-7-8-10-11-9-6-4-2-1-75-0	180	200
2	0-20-24-25-27-29-30-28-26-23-22-21-49-0	180	200
3	0-67-65-63-62-74-72-61-64-68-66-69-0	200	200
4	0-43-42-41-40-44-46-45-48-51-50-52-47-0	150	200
5	0-90-87-86-83-82-84-85-88-89-91-0	170	200
6	0-98-96-95-94-92-93-97-100-99-0	190	200
7	0-57-55-54-53-56-58-60-59-0	200	200
8	0-13-17-18-19-15-16-14-12-0	190	200
9	0-32-33-31-35-37-38-39-36-34-0	200	200
10	0-81-78-76-71-70-73-77-79-80-0	150	200

5. 결 론

본 연구에서는 물류환경에 맞게 납기제약을 꼭 지켜야 하는 고객과 납기의 위반을 허용하는 고객으로 분류하여 두 종류의 납기가 있는 경우, 차량의 납기 지연시간을 최소화하면서 차량구입비와 이동비용을 최소화하기 위한 최적의 차량조합과 각 경로의 방문순서를 결정에 관한 것이다. 또한, 차량경로를 구성함에 있어 발견적 기법을 이용하여 문제의 제약조건을 만족하는 초기해를 구하고 이를 개선해나가는 반복적 개선기법을 제안하였다. 연속 삽입기법을 사용하여 제약조건을 만족하는 초기해를 구하고, 몇 개의 이웃해 생성방법과 GLS를 응용한 알고리즘을 이용하여 최적해를 구해나간다. 삽입기법은 Solomon(1987)과 Dullaret et. al.(2002)의 방법을 납기를 갖는 이기종 차량경로문제에 맞게 변형하여 사용하였다. 이웃해 생성방법으로는 교환이동, 삽입이동, 경로 분리(절단)이동을 개발하여 사용하였고 국부최적해(local optima)에 빠지는 것을 방지하기 위하여 GLS를 수정하여 사용하였다. 또한 차량구입비를 최소화하는 차량 조합을 찾기 위하여 경로를 분리하고 통합하는 방법을 사용하였다. 실험결과 본 논문에서 제안한 알고리즘은 대체로 우수한 해를 주는 것으로 나타났으나 국부 최적해에 빠지는 단점을 보인바, 향후에는 국부 최적해에 빠지지 않는 더 정확한 해를 구하기 위하여 다양한 이웃해 생성방법의 개발이 필요할 것이다.

참고문헌

- [1] Bramel, J. & D. Simchi-Levi; "Probabilistic Analyses and Practical Algorithms for the Vehicle Routing Problem with Time Windows," *Operations Research*, 44(3) : pp.501-509, 1996.
- [2] Danzig, G. B. & J. H. Ramer; "The Truck Dispatching Problem," *Management Science*, 6(1) : pp.88-91, 1959.
- [3] Desrochers, M & T. Verhoog; "A New Heuristic for the Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem," *Computer & Operations Research*. 18(3) : pp.263-274, 1991.
- [4] Dullaert, W., GK. Janssens, K. Sorensen & B. Vernimmen; "New heuristic for the Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem with Time windows," *The Journal of Operational Research Society*, 53(11) : pp.1232-1238, 2002.
- [5] Etezadi, T. & J. E. Beasley; "Vehicle fleet composition," *The Journal of the Operational Research Society* 34(1) : pp.87-91, 1983.
- [6] Gould, J.; "The size and composition of a road transport fleet," *Operational Research Quarterly*, 20(1) : pp.81-92, 1969.
- [7] Jacques Renaud & F. F. Boctor; "A Sweep-based algorithm for the Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem," *European Journal of Operational Research*, 140(3) : pp.618-628, 2002.
- [8] Lau, H. S., M. Sim & K. M. Teo; "Vehicle routing problem with time windows and a limited number of vehicles," *European Journal of Operational Research*, 148(3) : pp.559-569, 2003.
- [9] Liu, F. H. & S. Y. Shen; "The Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem with Time Windows," *The Journal of the Operational Research Society*, 50(7) : pp.721-732, 1999.
- [10] Potvin, J. Y. & J. M. Rousseau; "A Parallel Route building Algorithm for the Vehicle Routing and Scheduling Problem with Time Windows," *European Journal of Operational Research* 66(3) : pp.331-340, 1993.
- [11] Salhi, S. & G. K. Rand, "Incorporating Vehicle Routing into the Vehicle Fleet Composition Problem," *European Journal of Operational Research*, 66(3) : pp.313-330, 1993.
- [12] Solomon, M. M; "Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problems with Time Windows Constraints," *Operations Research*, 35(2) : pp.254-265, 1987.
- [13] Stefan Irnich; "A Multi-depot Pickup and Delivery Problem with a single hub and Heterogeneous Vehicles," *European Journal of Operational Research*, 122(2) : pp.310-328, 2000.
- [14] Thangiah, S. R., I. H. Osman, R. Vinayagamoorthy & T. Sun; "Algorithms for Vehicle Routing Problems with Time Deadlines," *American Journal of Mathematical and Management Sciences*, 13(3/4) : pp.322-355, 1995.
- [15] Voudouris, C. & E. Tsang, "Guided Local Search," *Technical Report CSM- 247*, Department of Computer Science, University of Essex, Colchester, UK. 1995.
- [16] Woods, D. G. & F. C. Harris; "Truck Fleet size composition for concrete distribution," *International Journal of Physical Distribution & logistics management*, 10(1) : pp.3-14, 1979.