울산대학교 경영학 연구논문집 제4권 1호 pp 1~13, 1997
Journal of Management Vol. 4, No 1, pp 1~13, 1997
University of Ulsan

輸送手段의 經路選定에 관한 研究*

李 永 德
經營學部

<요 약>

산업사회에서의 물류문제는 점차 비중이 커지고 있다. 여러 가지 물류문제중 수송수단의 경로선정을 효과적으로 하여 수송시간이나 수송거리를 단축하여 비용을 줄이는 과제는 OR분야에서 VRP(vehicle routing problem)라 하여 연구되고 있다. VRP에는 기본문제를 비롯하여 여러 가지 다른 특성을 고려한 확장된 문제들이 있다. VRP를 풀이하는 해법은 최적해를 구하는 최적화방법과 만족할만할 근사최적해를 구하는 발견적 방법이 있는데, VRP의 복잡성 등으로 인하여 발견적해법이 많이 사용되고 있다. 본 연구에서는 VRP의 기본문제를 비롯하여 여러 가지의 확장된 문제 유형을 정리하고, 또한 이 문제들을 풀이하는 해법들을 살펴보아, 실제산업현장의 여러 특성에 알맞게 적용할 수 있는 기반을 마련하고자 한다.

A Study on The Vehicle Routing Problem

Young-Deok Lee
Dept of management

<Abstract>

We consider the vehicle routing problem(VRP) in which a vehicle delivers(or pick-up) goods stored at a central depot to satisfy customers' demands Each vehicles

* 이 논문은 1995학년도 울산대학교 학술연구조성비에 의하여 연구되었음.

has a fixed capacity. The decision in VRP involves determining which of the demands will be satisfied by each vehicle and what route each vehicle will follow in servicing customers' demands in order to minimize total delivery cost. A VRP model is introduced, and many variants of the VRP are studied in this paper Optimization algorithms and heuristics have been studied for solving VRP, where a great deal of work has been done devising heuristics for the VRP

1. 서 론

급속한 산업발전에 따라 인적, 물적 자원의 이동이 급속도로 증가하고 있으며, 이들의 원활한 이동문제는 현대산업사회의 중요한 문제로 부각되고 있다. 물류이동을 원활하게 하기 위해서는 도로, 항만과 같은 기반시설과 효율적인 수송수단의 개발 등의 하드웨어적인 발전을 근본적으로 필요로 한다. 그러나 이러한 하드웨어의 질적, 양적 확충을 위해서는 막대한 자금과 시간 그리고 기술적 발전을 필요로 하기 때문에 하드웨어의 확충에만 노력을 기우릴 수는 없고, 이들 하드웨어를 효율적으로 운영할 수 있는 소프트웨어의 개발에도 노력을 기울어야 한다. 기존의 시스템을 효율적으로 운영하여 효율을 30% 향상시키는 것은 하드웨어를 30% 증설하는 것과 마찬가지의 효과를 가져오나, 일반적으로 하드웨어의 확충에는 훨씬 더 많은 자금과 시간이 소요된다. 따라서, 물류이동의 효율적 이동을 위해서는 소프트웨어적인 운영의 개선에도 많은 노력을 하여 기존의 시스템을 효율적으로 이용하는 것을 우선적으로 고려하고, 하드웨어의 확충은 기존 시스템의 효율적인 운영이 전제된 후에 중, 장기적인 계획으로 추진되어야 한다. 물론 현재 우리 나라(한국)는 물류시스템이 워낙 부족하기 때문에 도로, 철도 그리고 항만 등의 하드웨어의 확충은 더 이상 미룰 수 없는 시급한 문제이나, 이럴 때일수록 상대적으로 적은 노력으로 빠른 효과를 볼 수 있는, 소프트웨어적인 운영방법의 개선 등이 더욱 필요하다 하겠다.

물류시스템을 효율적으로 운영하기 위해서는 여러 가지 면에서 개선이 이루어 져야 한다 시스템의 체제개선, 항만과 도로 등의 하드웨어 운영방법 개선, 물류의 집합・분산 시스템 개선, 수송 정보시스템의 효율적 운영 그리고 수송수단의 효율적 운영 등 여러 가지 면에서 개선이 이루어져야 하는데, 본 논문에서는 수송수단의 효율적인 운영에 초점을 두며, 특히 수송수단의 효율적 운영을 위한 경로 선정문제를 다루기로 한다.

수송수단의 경로선정문제(VRP: vehicle routing problem)는 물류시스템을 효율적으로 운영하기 위해서는 매우 중요한 문제로, 계량적 접근방법으로 많은 연구가 이루어져 왔으며, O.R분야 에서의 중요한 관심문제 중의 하나이다. 이 문제에서는 물류센터에서 여러 곳의 장소로 물품들을 배송하거나, 여러 곳의 장소로부터 물품을 수집하여 물류센터로 집합시키게 되는데, 이 때의 수송수단의 운영방법(방문순서)에 따라 비용(시간)이 달라지게 된다. 수송수단의 운영방법의 경우의 수는 매우 복잡하게 많아서 매우 빠른 컴퓨터로도 모든 경우를 점검하기 어려울 정도인데, 계량적인 연구에 의해 비용이 가장 적게 드는(혹은 비교적 만족할 정도로 적게드는) 방법을 찾고자 한다

VRP는 여러 학자들에 의해 여러 각도로 연구가 진행되어 왔는데, VRP의 기본이 되는 문제는 여행판매원문제(TSP: traveling salesman problem)이다. TSP에서는 판매원이 본부

(home)를 떠나 여러 곳의 세워된 방문지를 모두 방문하고 돌아와야 하는 상황에서 총방문비용(총방문시간)을 최소화하는 방법을 찾는 문제인데, 방문 때 생기는 경로 사이클이 하나 생기는 문제로, VRP에서는 방문 사이클의 수에 제한이 없는 데(일반적으로는 수송수단의 능력 등으로 수송싸이클이 여러 개 생기게 된다) 비하면 TSP는 VRP의 특수한(기본적인 단순한) 형태라 할 수 있다

TSP는 Dantzig, Fulkerson 그리고 Johnson[8] 이 수리적 모형을 개발하여 연구한 이래로, 수많은 학자들이 여러 가지 각도의 문제로 여러 가지 해법을 가지고 연구하였다. VRP도 여러 가지 기준에 의하여 여러 가지 형태의 문제로 나뉘어 지는데, 특정 방문지의 방문시간 제약, 수송수단 거주지(domiciles)의 수, 수송수단의 수, 수요의 확정성 여부, 수요의 소재지(마디 혹은 가지) 그리고 수송방향의 방향성 등에 의하여 여러 가지 문제로 나뉘어 진다 본 논문에서는 TSP와 VRP의 기본 문제를 바탕으로 하여 여러 가지 변형된 문제들을 살펴보아, 수송수단의 효율적인 이용을 통하여 물류시스템의 비용을 절감할 수 있도록, 기존의 연구들을 정리 해 보고자 한다.

2. 여행판매원문제(traveling salesman problem: TSP)

여행자가 n개의 방문지를 거쳐 출발지로 돌아오는 문제로(이문제의 해의 경우의 수는 n!, 혹은 (n-1)!), 방문사가 방문지를 거치는 순서에 따라 전체방문에 걸리는 시간(비용)이 달라지게 된다. 이 문제는 O.R(계량경영학)분야의 가장 중요한 문제의 하나로 여러 분야에 응용이 되는데, TSP를 스케쥴링 문제로도 볼 수 있으며, 제품을 생산하기 위해서는 n개의 공정을 모두 거쳐야 하면서 공정 i를 거쳐 공정 j 로 넘어갈 때의 시간(비용) c_{ij}가 순서에 따라 다를 때, 총 완성시간(비용)을 최소화 하기 위한 순서(schedule)를 찾는 것이다 TSP는 VRP의 기본형태로, VRP에서 수송수단이 하나이고 한번의 수송 사이클을 통하여 보는 방문지를 방문하고 돌아오는 문제가 된다

1) TSP의 기본모형

TSP의 수리적모형은 여러 가지 형태가 있는데, 기본모형은 다음과 같다.

$$\text{Min} \quad \sum_i \sum_j c_{ij} x_{ij} \qquad (1)$$

$$\text{s t} \quad \sum_i x_{ij} = 1, \quad j = 1, \ldots, n \qquad (2)$$

$$\sum_j x_{ij} = 1, \quad i = 1, \ldots, n \qquad (3)$$

$$\text{subtour breaking constraints} \qquad (4)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall\, i, j \qquad (5)$$

여기에서

c_{ij} : 방문지 i 에서 방문지 j 까지의 거리(혹은 시간, 비용)

x_{ij} : 방문자가 방문시 i에서 방문지 j로 직접가면 1, 아니면 0

(1)식은 방문지 전체를 거쳐오는 총시간을 최소화하는 목적함수식이고, (2)식은 방문지 j로는 한군데 방문지로부터만 올 수 있음을 나타내며, (3)식은 방문지 i 에서는 한군데 방문지로만 갈 수 있음을 나타낸다. 그런데 (2)식과 (3)식만으로는 모든 방문지를 돌아오는 완전한 여행이 아닌 부분여행(subtour)이 될 수 있다 이를 방지하는 (4)식이 필요한데 (4)식은 다음과 같은 식으로 표시된다

- subtour breaking constraints : (4)식

(1) Dantzig, Fulkerson and Johnson[8] 의 모형

$$\sum_{i\in Q}\sum_{j\in Q}x_{ij} \le |Q| - 1$$

$$\text{for all } Q \subseteq \{1, 2, \ldots, n\} \text{ and } 2 \le |Q| \le n - 1$$

(2) Miller, Tucker and Zemlin[18] 의 모형

$$u_i - u_j + n x_{ij} \le n - 1 \text{ for all } j \ne 1 \text{ and } i \ne j$$

여기에서, $u_i(i=1, \ldots, n)$: 방문지 i와 관계된 변수

(3) Gavish and Graves[14] 의 모형

$$\sum_j z_{ij} - \sum_{j\ne 1} z_{ji} = 1, \quad i=2, \ldots, n$$

$$z_{ij} \le (n-1)x_{ij}\ , \quad i=2, \ldots, n\ , \quad j=1, \ldots, n$$

$$z_{ij} \ge 0, \ \text{for } all\ (i, j)$$

여기에서, z_{ij} 가지 (i, j)와 관련된 변수

2) TSP의 변형모형

TSP의 변형모형들은 여러 학자들에 의하여 여러 방법으로 연구가 되었다 그 중 중요한 것들을 살펴보면 다음과 같다

(1) 시간 의존적 TSP(time dependent traveling salesman problem TDTSP)

TDTSP에서는 방문지의 방문순서에 따라서 방문시간(비용)이 달라지는 경우이다 즉 일반 TSP에서는 방문 비용이 c_{ij}로 나타나는데 비하여 TDTSP에서는 c_{ijt}(t는 방문순서와 관계된 첨자)로 나타난다 Picard 와Queyranne[22]은 3가지 형태의 모형을 제시하여 서브그래디언트 최적화와 분단 탐색법 등으로 문제를 풀었다. Fox, Gavish 그리고 Graves[13]는 n(n은 방문지의 수)개의 제약식으로 나타내는 모형을 제시하였다 Bianco, Mingozzi 그리고 Ricciardelli[5]는 두가지 해법을 제시하였는데, 하나는 라그랑지안 완화법에 바탕을 둔 해법이며, 다른 하나는 동적계획법에 바탕을 둔 발견적 해법이다.

(2) 시간창이 있는 TSP(traveling salesman problem with time windows-TSPTW)

TSPTW는 특정 방문지(마디)들이 일정한 시간대에 방문되어야 하는 제약하에 총방문비용(시간)을 최소화하는 방문계획을 찾는 문제이다. Chrostofides, Mingozzi 그리고 Toth[6]는 동적계획법에 바탕을 둔 해법을 연구하였다. Baker[1]는 시간에 기반을 둔 다른 형태의 모형을 제시하였는데, 쌍대모형에 기반을 둔 最長거리문제로 해석하여 분단탐색법으로 문제를 풀었다. Langvin등[15]은 두가지상품 흐름문제(two-commodity flow problem)로 TSPTW를 모형화 하여 분단탐색법으로 문제를 풀었다

(3) 일반화된 TSP

이 밖에도 여러 가지의 TSP의 변형문제들이 있다. Volgenant와 Jonker[25]는 일반화된 TSP(generalized TSP, GTSP)에 관한 연구를 하였는데, 이 문제에서는 방문자는 방문지를 한번만 방문 할 수 있으며, 방문을 못하는 경우에는 페널티를 물게된다. Balas[3]는 상금획득 TSP(prize collecting TSP)를 연구하였는데, GTSP와 성격이 비슷한 문제이다. Malandraki와 Daskin[16]은 최대이익 TSP(maximum benefit TSP)를 제시하였는데, 이 연 구의 모형은 GTSP와 다른 형태이나, GTSP와 비슷한 의미를 가지고 있다. 이밖에도 TSP에 관한 여러 가지 다른 형태의 변형된 TSP들에 관한 연구들이 있는데, Ong[19], Current와 Schilling[7], Simch-Levi와 Beman[24], Punnen[23] 그리고 Paletta[21]의 연구들이 있다.

3. 수송수단 경로선정문제(vehicle routing problem; VRP)

여러 곳에 분산된 방문대상지에 주어진 기간동안 수송수단(vehicle)을 통하여 방문을 하여야 하는 상황은 산업사회에서 흔히 발생하는 상황이다. 이러한 상황에 관한 문제를 수송수단 경로선정문제(vehicle routing problem, VRP)라 한다. VRP는 다른 이름으로도 불려지는데, 수송수단 스케쥴문제(vehicle schedule), 트럭 수송문제(truck dispatching problem), 배달문제(delivery problem)등으로도 불린다. VRP는 가장 기본적인 형태의 문제와 모형에서부터 여러 가지 형태로 확장되고 변형된 문제들이 있으며, 여러 학자들에 의하여 많은 연구가 이루어 졌다.

1) VRP의 기본모형

VRP는 출발지를 출발하여 수송수단을 통하여 여러 곳의 분산된 방문지를 방문하고 돌아오는 문제로, 기본 형태는 그림과 같은 상황을 나타낸다

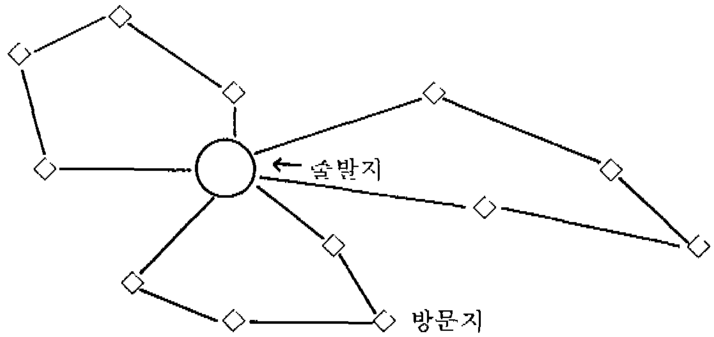

그림 VRP의 기본상황

기본적인 VRP의 수리적 모형은 여러 학자가 여러 형태로 나타냈는데, 그중 대표적인 것은 Fisher와 Jaikumar[12]의 모형으로 다음과 같다.

$$\text{Min} \quad \sum_{i,j} c_{ij} \sum_{k} x_{ijk} \tag{1}$$

$$\text{s t} \quad \mathrm{sum}_k y_{ik} = m \qquad i=1 \tag{2}$$

$$1, \qquad i=2,\dots,n,$$

$$\sum_i q_i y_{ik} \le Q_k, \qquad k=1,\dots m, \tag{3}$$

$$\sum_j x_{ijk} = \sum_j x_{jik} = y_{ik}, \qquad i=1,\dots n,\ k=1,\dots m, \tag{4}$$

$$\sum_{i,j\in S} x_{ijk} \le |S| - 1, \qquad \forall\ S \subseteq \{2,\dots,n\},\ k=1,\dots m, \tag{5}$$

$$y_{ik} \in \{0,1\}, \qquad i=1,\dots n,\ k=1,\dots m, \tag{6}$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\}, \qquad i,j=1,\dots,n,\ k=1,\dots,m, \tag{7}$$

여기에서

x_{ijk} - 1, 수송수단 k가 방문지 j를 방문지 i 다음으로 방문할 때

0, 아닐 때

y_{ik} - 1, 방문지 i가 수송수단 k로 방문되어 질 때

0, 아닐 때

제약식(2)는 출발지1(depot)을 제외한 모든 방문지는 반드시 하나의 수송수단을 통하여 방문되어야 함을 나타내며, 모든 수송수단(m개)이 출발지로 돌아와야 하므로 모든 수송수단은 출발지1을 방문하여야 함을 나타낸다. 제약식(2)는 수송수단의 수용능력(capacity)과 관련되어 있으며, 제약식(4)는 임의의 방문지를 방문한 수송수단은 그 방문지를 반드시 떠나야 함을 의미한다. 그리고 제약식(5)는 부분여행(subtour)을 방지하는 식으로, TSP에서 나타났던 제약식이다.

2) 시간창이 있는 VRP(vehicle routing problem with time windows; VRPTW)

일정한 시간대 이내에 특정 방문지를 방문하여야 하는 경우를 다룬 문제이다. 이 문제는 방문지를 특정 시간대에 반드시 방문하여야 하는 경우(hard time windows)와 특정시간대에 방문하지 못하면 페널티를 무는 경우(soft time windows)의 두 가지로 나뉘어 진다. VRPTW에 관한 연구는 Orloff[20]의 연구를 비롯하여 Desrosiers, Soumis 그리고 Desrochers[9] 의 연구, Desrosiers, Soumis, Desrochers 그리고 Sauve[10]의 연구, Ferland 그리고 Fortin[11]의 연구, Balakrishnan[2]의 연구 등 여러 가지가 있는데, 그중 Desrosiers, Soumis 그리고 Desrochers[9]의 연구에서 모형화한 VRPTW의 수리적모형은 다음과 같다.

$$\text{Min} \quad \sum_{(i,j)\in AW} c_{ij} x_{ij} \qquad (1)$$

$$\text{s.t} \quad \sum_{j\in PW_i} x_{ij} = 1, \qquad 1 \le i \le n, \qquad (2)$$

$$\sum_{j\in BW_i} x_{ji} = 1, \qquad 1 \le i \le n, \qquad (3)$$

$$x_{ij} = 0 \text{ or } 1, \qquad (i,j)\in AW, \qquad (4)$$

$$x_{ij} > 0 \;\Rightarrow\; ET_i + t_{ij} \le ST_j, \quad (i,j)\in \overline{AW}, \qquad (5)$$

$$a_i \le ST_i \le b_i, \qquad 1 \le i \le n, \qquad (6)$$

여기에서

$AW = \{(i,j):\ a_i + D_i + t_{ij} \le b_j,\ 1 \le i,j \le n\} \cup \{(i,j),(g,i): 1 \le i \le n\}$,

$\overline{AW} = \{(i,j) \in AW\ \ i,j \ne g\}$,

$PW_i = \{j: (i,j) \in AW\}$,

$BW_i = \{j: (j,i) \in AW\}$,

g ; 수송수단이 출발하고 돌아오는 장소 for all $(i,j) \in AW$,

$c_{i,j} = c_g$ if $i = g$ or $j = g$,

$\quad t_{ij}$ *otherwise*

제약식 (2)는 방문된 방문지 i에서는 다른 방문지로 떠나야함을 의미하고, 제약식 (3)은 모든 방문 대상지는 정확히 1번 방문을 받아야함을 나타낸다. 제약식 (5),(6)은 방문지 i가 방문 받아야하는 시간창(time windows)과 이 시간대내에 방문을 받아야함을 의미한다.

3) 시간 의존적 VRP(time dependent vehicle routing problem TDVRP)

수송수단이 한 지점에서 다른 지점으로 가는데 소요되는 시간이 시각에 따라 다를 때(예를 들면 오전, 오후 등 교통상황에 따라 통과시간이 다를 때), 여러곳의 방문지를 수송수단들을 이용하여 돌아오는 방법 중 총비용(총 소요시간)을 최소화하는 방법을 찾는 문제이다. 이 문제는 TDTSP(time dependent traveling salesman problem)에서 수송수단이 여러 개로 확장된 형태이다. TDVRP에는 시간창(time windows)을 고려하기도 하고 고려하지 않기도 한다. TDVRP는 Malandraki 와 Daskin[16]이 수리적모형을 제시하면서 발견적 해법(heuristic algorithms)을 제시하였는데, 수리적 모형은 다음과 같다

$$\text{Min} \quad \sum_{k=1}^{K} t_{n+k} \tag{1}$$

$$\text{s.t} \quad \sum_{i=1, i\neq j}^{n} \sum_{m=1}^{M} x_{ij}^{m} = 1 \quad (j=2, \ldots, n+K) \tag{2}$$

$$\sum_{j=2, j\neq i}^{n+K} \sum_{m=1}^{M} x_{ij}^{m} = 1 \quad (i=2, \ldots, n) \tag{3}$$

$$\sum_{j=2}^{n} \sum_{m=1}^{M} x_{1j}^{m} = K \tag{4}$$

$$t_1 = t \tag{5}$$

$$t_j - t_i - B_1 x_{ij}^{m} \geq c_{ij}^{m} + c_j - B_1$$
$$(i=1, \ldots, n;\ j=2, \ldots, n+K;\ i\neq j;\ m=1, \ldots, M) \tag{6}$$

$$t_i + B_2 x_{ij}^{m} \leq T_{ij}^{m} + B_2$$
$$(i=1, \ldots, n;\ j=2, \ldots, n+K;\ i\neq j;\ m=1, \ldots, M) \tag{7}$$

$$t_i - T_{ij}^{m-1} x_{ij}^{m} \geq 0$$
$$(i=1, \ldots, n;\ j=2, \ldots, n+K;\ i\neq j;\ m=1, \ldots, M) \tag{8}$$

$$L_i + c_i \leq t_i \leq U_i + c_i \quad (i=1, \ldots, n+K) \tag{9}$$

$$w_j - w_i - B \sum_{m=1}^{M} x_{ij}^{m} \geq d_j - B \quad (i=1, \ldots, n;\ j=2, \ldots, n+K;\ i\neq j) \tag{10}$$

$$w_1 = 0 \tag{11}$$

$$w_{n+k} \leq b_k \quad (k=1, \ldots, K) \tag{12}$$

$$x_{ij}^{m} = 0 \text{ or } 1 \quad \forall\ i, j, m \tag{13}$$

$$t_i \geq 0 \quad \forall i \tag{14}$$

$$w_i \geq 0 \quad \forall i \tag{15}$$

여기에서

n ; 출발지를 포함한 방문지들의 수

M ; 시간간격(time interval)의 수

K ; 수송수단의 수

c_{ij}^m ; 수송수단이 시간대 m에 방문지 i에서 방문지 j를 방문하였을 때 걸리는 시간 ($c_{ii}^m = \infty \quad \forall i, m$)

x_{ij}^m = 1, 수송수단이 시간대 m에 방문지 i에서 방문지 j를 바로 (directly) 방문하였을 때

0, 아닐 때

c_i , 방문지 i에서의 서비스시간 ($c_i = 0$ for $i = 1, n+1, \ldots, n+K$)

T_{ij}^m ; 가지(link) (i, j)의 시간간격 m의 상한(upper bound)

t ; 출발지 1을 떠나는 시간

t_j ; 수송수단이 방문지 j를 떠나는 시간

b_k ; 수송수단 k의 용량(weight or volume capacity)

d_i , 방문지 i에서 모은 수송품의 용량(weight or volume)

($d_i = 0$ for $i = 1, n+1, \ldots, n+K$)

w_j, 방문지 j를 떠날 때 수송수단이 운반하는 무게나 부피

B_1 , 아주 큰 수

B_2 ; 아주 큰 수

B ; 수송수단중 가장 큰 용량

L_i ; 수송수단이 방문지 i에 도착할 수 있는 가장 빠른 시간(earliest time)

U_i , 수송수단이 방문지 i에 가장 늦게 도착해도 되는 시간(latest time)

목식함수식 (1)은 수송시간과 서비스시간을 합한 모든 수송수단들의 수송시간을 최소화하는 식이다. 제약식 (2),(3),(4)는 모든 방문지는 정확히 한 번씩 방문되어야 하며, 수송수단이 K대임을 의미한다. 제약식 (5)는 모든 수송수단들이 출발지(depot)를 출발하는 시간은 t임을 나타낸다. 제약식 (6)을 통하여 방문지 j의 출발시간이 계산되며, 제약식 (7),(8)을 통하여 방문지 i를 떠나는 시간에 따라 마디(node) i, j간의 m개의 가지(link)가 설정됨을 의미한다 제약식 (9)는 방문지들이 방문되어야 하는 시간창(time windows)을 의미하며, 이 제약식이 빠지면 시간창이 없는 문제가 된다 제약식 (10),(11),(12)은 용량과 관계된 제약식으로, 제약식 (11)은 모든 수송수단은 빈 상태로 출발지를 떠나야 함을 나타내는데, 이 문제가 물량(goods)을 수집(pick-up)하여 오는 문제로 모형화된 것을 나타내며, 물량을 배송하는 문제가 되면 이 제약식은 바뀌게 된다 제약식 (10)은 수송수단에 실린 물량은 전 방문지까지 실은 물량이상이어야 함을 의미하고, 제약식 (12)는 수송수단에 실은 물량

은 수송수단의 능력(capacity)을 초과할 수 없음을 나타낸다.

4) 기타의 VRP의 문제

VRP는 위의 문제 외에 여러 가지 유형의 문제들이 있다. 여러 가지 유형 중, 첫째는 출발지(depot)가 한곳인 문제와 여러 장소에 분산되어 있는 문제가 있다. 두 번째 유형은 수송수단이 하나인 것과 여러 대인 것 그리고 여러 대의 수송수단의 수송능력이 모두 일정한 것과 각기 다른 것 등으로 나뉘어진다 세 번째는 방문지의 수송수요가 정해져 있는 문제와 변화하는(stochastic)문제로 나뉘어지며, 다섯 번째는 방문지간의 가지(link: 도로)가 방향이 없는 경우와 방향이 있는 경우이다 여섯 번째는 수송수단들의 운행시간에 관한 것으로, 운행시간의 제약이 없는 것과 제약이 있는 것 그리고 운행제약시간이 수송수단별로 다른 것 등이 있다. 일곱 번째는 운영방법에 관한 것으로 수송물을 수집(pick-up)하여 오는 문제와 배달(drop)하고 오는 문제 그리고 두 가지가 섞여져 있는 문제인데, 두 가지가 혼합되어 있는 문제는 매우 복잡한 문제가 된다. 여덟 번째는 목적함수와 관계된 것으로 수송경로와 관계된 비용(routing cost)을 최소화하는 문제와 고정비용과 변동비용의 합을 최소화하는 문제 그리고 필요한 수송수단의 수를 최소화하는 문제가 있다. 이상과 같은 사항이 VRP의 주요한 유형이며, 이밖에도 사소한 변화에 따른 다른 유형의 문제들도 있다

5) VRP의 해법

(1) VRP의 최적화 해법(optimization algorithms)

VRP는 문제가 매우 복잡하고 크기가 큰 문제이므로 VRP의 해법은 대개 발견적해법이 주류를 이루고 있다. 최적화 해법은 VRP의 기본모형을 중심으로 연구가 되고 있는데, 그 내용은 다음과 같다.

① 벤더스 분해기법(Benders decomposition)을 이용한 해법

Fisher와 Jaikumar[12]의 모형을 살펴보면, 이 모형은 제약식 (2),(3),(6)으로 이루어지는 일반화할당문제(generalized assignment problem)의 부분과 제약식 (4),(5),(7)로 이루어지는 TSP 의 부분으로 구성되어 있음을 알 수 있다. 따라서 이 문제는 다음과 같은 일반화할당문제로 표시할 수 있다.

$$\text{Min} \quad \sum_k f_k(y_k)$$

s.t 제약식 (2),(3),(6)

여기에서 $f_k(y_k) = \min \{\sum_{i,j} c_{ij} x_{ijk}\}$

s.t 제약식 (4),(5),(7)

마찬가지로 이 문제는 TSP로 표시할 수 있는데, 그 모형은 다음과 같다.

$$\text{Min} \quad \sum_k f_k(y_k)$$

s.t 제약식 (4),(5),(7)

여기에서 $f_k(y_k) = \min \{\sum_{i,j} c_{ij} x_{ijk}\}$

s.t 제약식 (2),(3),(6)

이상과 같이 일반화 할당문제나 TSP로 VRP를 표시한 후 벤더스분해기법으로 문제를 푼다.

② 셀 커버링(set covering)에 의한 해법

VRP를 셀 커버링문제로 해석하여 Fisher와 Jaikumar[12]의 모형과는 다르게 hristofides, Mingozzi 그리고 Toth[6]에 의해 셀 커버링 모형이 개발되었는데, 이 모형은 Marsten[17], Balas와 Padberg[4]등이 연구한 셀 커버링 해법을 적용하여 풀 수 있다.

③ 분단탐색법(branch and bound method)

일반적으로 정수계획법의 해법으로 분단탐색법을 이용하는 것과 마찬가지로, VRP의 해법에도 분단탐색법이 사용되고 있는데, Christofides, Mingozzi 그리고 Toth[6]도 분단탐색법을 이용하여 해법을 완성하였다.

(2) 발견적 해법(heuristic algorithms)

VRP는 문제의 규모(size)나 복잡성 등으로 정확한 최적해(exact optimal solution)를 구하는데 여러 어려움이 있다. 더구나 여러 가지 유형의 변형된 VRP는 더욱 복잡한 문제가 되기 때문에, 발견적 방법으로 해를 구하는 것이 연구의 일반적인 추세이다. VRP의 발견적 해법은 건설적 방법(constructive methods), 2단계방법(two-phase method) 그리고 미완성 최적화방법(incomplete optimization methods)등으로 나뉘어진다.

① 건설적 방법(constructive methods)

이 방법은 실현가능한 경로(route)를 하나씩 구성해 나가는 방법으로, 경로의 한가지를 변화시킬 때의 비용절감분(savings)을 구해가면서 경로를 변화시켜, 만족할 해를 구한다.

② 2단계방법(two-phase method)

이 방법에서는, 전체 문제를 한 수송수단이 담당하여야할 집단(cluster)을 구하는 문제와 이 집단에서의 수송경로(routes)를 구하는 문제의 두 가지로 나누어 볼 수 있는데, 해법을 진행하는 방법에 따라, 수송수단이 담당하여야 할 집단을 먼저 정하고 수송경로들을 나중 구하는 집단-우선 경로-두번째(cluster-first route-second)와 수송경로들을 구해가면서 집단을 고려하는 경로-우선 집단-두번째(route-first cluster-second)방법의 두 가지가 있다.

③ 미완성 최적화방법(incomplete optimization methods)

이 방법은 최적화방법의 분단탐색법의 과정 등에서 모든 부분을 탐색하지 않고, 일정한 규칙에 의해 일정부분을 생략하는 것이다 따라서 이 방법에 의한 해는 최적해라는 보장은 없으나 많은 계산과정을 생략하여 비교적 빠른 시간에 만족할만할 해를 구할 수 있다.

4. 결 론

산업사회에서 발생하는 많은 비용 중 물류비용은 점차 증대되고 있으며, 물류비용을 줄여 경쟁력을 갖추는 것은 매우 중요한 문제이다. 물류비용을 줄이는 방법은 여러 가지가 있는데, 그 중 수송수단의 운행경로를 효율적으로 선정하여 운행시간(운행거리, 운행비용)을 줄이는 것은 별도의 하드웨어적 부사 없이(컴퓨터의 사용이나 연구에 대한 비용은 필요) 실행할 수 있는 방법이다. 수송수단의 경로선정문제(vehicle routing problem: VRP)는 매우 복잡한 OR문제로 모형화 되는데, 워낙 복잡한 문제이므로 그 중요성에 비해 연구가 활발한 편은 아닌 것 같다 본 연구에서는 VRP의 기본이 되는 여행판매원문제(traveling salesman problem TSP)와 VRP의 확장문제 그리고 VRP의 기본문제와 중요한 확장문제들을 정리하여 살펴보았다. VRP의 해법은 최적해를 찾는 방법과 발견적 해법(heuristic algorithms)으로 나뉘어 지는데, VRP 확장문제들은 기본문제보다도 훨씬 더 복잡하므로 주로 발견적 해법에 의해 만족할만한 해를 구하고 있다. 실제현장(real world)에서 발생하는 수송수단의 경로선정문제는, 현장에서 각기 가지고 있는 추가 상황들이 있기 때문에, 확장된 VRP 형태를 띠게되는데 기존의 연구를 바탕으로 현장에 알맞는 해법을 보완 개발하여 적용하는 것이 바람직하다. 실제현장의 수송수단 운영에 관한 문제는 매우 복잡하기 때문에 수리적으로 모형화하여 대안을 구하는 것은 매우 전문적이고 어려운 문제이나, 이제는 과학적인 방법에 의한 비용절감이 필요하며 기존의 연구들을 참고하여 현실에 알맞도록 연구하는 것이 필요하다.

참 고 문 헌

1. Baker, B., S., "An exact algorithm for the time constrained traveling problem", Operations Research 31, (1984), pp.938-945.
2. Balakristian, N., "Simple heuristics for the vehicle routing problem with soft time windows", Journal of Operations Research Society 44 No. 3, (1993), pp 279-287.
3. Balas, E., "The prize collecting traveling salesman problem", Networks 19, (1989), pp.621-636
4. Balas, E., and Padberg, M., W., "Set partitioning. a survey", SIAM Review 18, (1976), pp.710-760
5. Bianco, Mingozzi and Ricciardelli, "The traveling salesman problem with cumulative costs", Networks 23, (1993), pp.81-91
6. Christofides, N., Mingozzi, A., and Toth, P, "Exact algorithms for the vehicle routing problem based on spanning tree and shortest path relaxations", Mathematical Programming 20, (1980), pp.255-282.
7. Current, J., R, and Schilling, D., A, "The covering salesman problem", Transportation Science 23, (1989), pp.208-213.
8 Dantzig, G, B, Fulkerson, D., R, and Johnson, S, M, 'Solution of a large scale traveling salesman problem", Operations Research 7, (1959), pp.58-66.

9. Desrosiers, J., Soumis, F., and Desrochers, M., " Routing with time windows by column generation", Networks 14, (1984), pp 545-565.
10. Desrosiers, J., Soumis, F., Desrochers, M., and Sauve, M., "Methods for routing with time windows", European Journal of Operations Research 23, (1986), pp 236-245
11. Ferland, J., a., and Fortin, L., "Vehicles scheduling with sliding time windows", European Journal of Operations Research 38, (1986), pp.213-226
12. Fisher, M., L., and Jaikumar, R., " A generalized assignment heuristic for vehicle routing", Networks 11, (1981), pp.109-124
13. Fox, K., R., Gavish, B., and Graves, S., C., "An n-constraint formulation of the time dependent traveling salesman problem", Operations Research 28, (1980), pp.1018-1021
14. Gavish, B., and Graves, S., C., "The traveling salesman problem and related problems", Operations Research Letters 9, (1990), pp 127-132.
15 Langvin, A., Desrochers, M., desrosiers, J., Gelinas, S., and Soumis, F., "A two commodity flow formulation for the traveling salesman and the makespan problems with time windows", Networks 23, (1993), pp.631-640.
16. Malandraki, C., and Daskin, M., S., " Time dependent vehicle routing problems: formulations, prosperties and heuristic algorithms", Transportations Science 26, No. 3, (1992), pp.185-200.
17. Marsten, R., E., "An algorithm for large set partitioning problems", Management Science 20, (1974), pp 774-787.
18. Miller, C., E., Tucker, A., W., and Zemlin, R., A., "Integer programming formulation of traveling salesman problems", Journal of ACM 7, (1960), pp.326-329.
19 Ong. H., L., "Approximate algorithms for the traveling salesman pucher problem", Operations Research Letters 1, (1982) 201-205
20. Orloff, C., "Route Constrained Fleet Scheduling," Transportation Science, 10, (1976), pp.149-168
21. Paletta, G., "A multiperiod traveling salesman problem: Heuristic algorithms", Computers and O R 19, (1992), pp.789-795.
22 Picard, J., C., and Queyranne, M., "The time dependent traveling salesman problem and its applications to the tardness problem in one machine scheduling", Operations Research 26, (1978), pp 86-110.
23. Punnen, A., P., "Traveling salesman problem under categorization", newbook Operations Research 12, (1992), pp.89-95
24. Simich-Levi, D., and Bernan, O., "Optimal locations and districts of two traveling salesman on a tree", Networks 20, (1990), pp.803-815
25. Volgenant, T., and Jonker, R., "On some generalization of the traveling salesman problem", Journal of Operations Research Society 38, (1987), pp.1073-1079