

韓國 軍事運營分析 學會誌
第 12 卷 第 2 號, 1986.12.

배차문제 : 연구현황과 전망 (Vehicle Fleet Planning Problems : The State of the Art and Prospects)

송 성 현*
박 순 달**

Abstract

Vehicle fleet planning problem is generic name given to a whole class of practical decision making problems which find the vehicle routes and schedules to accomplish the required service to customers using vehicles.

In this paper the various problems are classified into the three groups according to their characteristics:

- (1) vehicle routing problems,
- (2) vehicle scheduling problems, and
- (3) vehicle routing and scheduling problems.

The State of the art of each group is described and the future research directions are presented.

1. 서 론

배차문제 (vehicle fleet planning problem)란 차량을 이용하여 고객에 대한 서비스를 수행하기 위한 차량운행경로 (vehi-

cle route)와 방문시간 및 순서 (vehicle schedule)를 정하는 제반문제를 말한다. 배차문제와 관련된 응용사례를 살펴보면 다음과 같다. 박순달 등(1984)은 대리점의 제품배달문제를 다루었고, Golden, et .al (1977)은

* 홍익대학교 산업공학과
** 서울대학교 산업공학과

신문배달 문제를, Abel(1981), Booler(1980) Oum(1979)은 철도운행문제를, Bokinge 와 Hasslstrom(1980), Wren(1981) 등이 대중 교통 차량 운행문제를 다루었다. 그리고 Marsten과 Muller(1980)은 비행기 운행문제를, Baker, et. al(1979), Sherali와 Rios(1984)는 비행기 승무원 승무계획 문제를 다루었으며, Green과 Kolesar(1984)는 순찰차 운행문제를, Swersey와 Bellard(1984)는 통학버스 운행문제를 다루었다. 또한 Beltrami와 Bodin(1974), Vu와 Turner(1975), Orloff(1974)는 쓰레기 수거차 운행문제를 다루었는데, 이 외에도 매우 많은 응용사례가 있다.

Bodin, et. al(1983), Bodin과 Golden(1981), Schrase(1981)은 배차문제와 관련된 특성요인에 따라 그 문제 형태가 다양함을 보였는데, 그 특성요인을 정리해 보면 다음과 같다.

(1) 차고수 또는 차량기지수

- 1) 단일 차고 (single depot)
- 2) 복수 차고 (multiple depots)

(2) 차량수

- 1) 단일 차량 (single vehicle)
- 2) 복수 차량 (multiple vehicles)
- 3) 칸막이 차량 (multicompartment vehicles)

(3) 차 종

- 1) 동일 종류
- 2) 다른 종류

(4) 수요형태

- 1) 확정적
- 2) 확률적

(5) 수요위치

- 1) 지점 (node)
- 2) 도로 (arc)

3) 혼합

(6) 네트워크 형태

- 1) 무방향
- 2) 유방향
- 3) 혼합

(7) 차량적재 용량

- 1) 모든 차량이 같음
- 2) 같지 않음
- 3) 무제한

(8) 차량경로의 최대 연속운행시간

- 1) 모든 차량이 같음
- 2) 같지 않음
- 3) 제한 없음

(9) 특정지역에 도착할 시간

- 1) 특정시각 (fixed time) 미리 지정
- 2) 상하한 (time window) 지정
- 3) 지정 없음

(10) 작업내용

- 1) 상차 (pickup only)
- 2) 하차 (drop-offs or delivery only)
- 3) 상하차 (pickup and delivery)
- 4) 분할배당 (split delivery) 허용유무

(11) 비용

- 1) 변동비 또는 운행비
- 2) 고정운영비 또는 차량구입비
- 3) 공공 교통요금

(12) 목적 함수

- 1) 총운행비용의 최소화
- 2) 고정비와 변동비 합계를 최소화
- 3) 필요 차량수의 최소화
- 4) 서비스나 편리성에 입각한 효용함수의 극대화
- 5) 고객우선순위에 입각한 효용함수의 극대화

(13) 기타 문제 특유의 제약조건

배차문제는 방문순서나 방문시간의 제약조건 유무에 따라 크게 3가지로 구분된다. 만

일 수요지점에 대한 방문시간 (timing) 제약이나 방문순서의 선행관계 (precedence relation) 제약이 없으면 차량 운행경로문제 (vehicle routing problem) 이라 하며, 방문시각이 미리 확정적으로 주어지면 차량운행시간 계획문제 (vehicle scheduling problem) 이라 한다. 또한 방문순서의 선행관계와 방문시간의 상하한 (time window) 이 주어지면, 차량운행경로 및 시간계획문제 (vehicle routing and scheduling problem) 라고 하며, 일반적으로 포괄적인 의미로서의 배차문제는 이 차량운행경로 및 시간계획문제를 일컫는다.

2. 차량운행경로문제 (Vehicle Routing Problem)

차량운행경로문제의 표준형태 (standard vehicle routing problem; VRP) 는 Dantzig 와 Ramser (1959) 가 최초로 고려한 것으로서, 본점에 적재용량이 같은 차량이 여러 대가 있고, 이들 차량들로 하여금 수요량이 미리 알려진 각 지점에 제품을 배달하고 본점으로 다시 돌아올 때, 총 운행거리를 최소화하기 위한 배달경로를 찾는 문제이다.

이 표준형태에 배차와 관련된 몇가지 특성요인과 가정을 가감하면 다음과 같은 몇가지 대표적인 명칭의 문제가 파생된다. 즉 외판원문제 (traveling salesman problem; TSP) 복수 외판원문제 (multiple traveling salesman problem; MTSP), 복수차고 차량운행문제 (multi-depot vehicle routing problem), 차량수 및 조달 방법결정문제 (fleet size and mix problem), 확률적 수요차량운행문제 (stochastic vehicle routing problem), 우편배달부문제 (chinese postman problem) 등이다. 이 중에서 가장 간

단한 형태의 문제는 외판원문제로서, 적재용량이 무한대인 차량 1대로써 본점을 출발하여 수요량이 1인 모든 수요지점을 방문하고 다시 본점으로 돌아올 때까지 총 운행거리가 최소화되기 위한 방문경로를 찾는 문제이다.

TSP를 포함한 거의 모든 차량운행경로문제는 그 본질적인 조합적 특성에 의거 Mag-nanti (1981) 에서와 같이 정수계획법으로 정식화가 가능하고, 또한 원칙상으로는 그 해법으로서 해결 가능하다. 그런데 TSP와 VRP는 계산의 복잡도 (computational complexity) 에 있어서 Lenstra 와 Rinnooy Kan (1981) 이 지적했듯이 NP-hard 부류에 속하므로 문제 크기가 커짐에 따라 상당한 계산시간과 기억용량을 필요로 하고 있다. 따라서 1959년 Dantzig 와 Ramser 가 차량운행경로문제 (VRP) 를 최초로 소개하고, 그 해법으로서 선형계획법을 이용한 발견적 기법을 제시한 이후, 지금까지의 대부분의 연구는 실용적인 측면에서 최적해 기법보다는 발견적기법 개발에 치중되어 왔다.

차량운행경로문제의 대부분의 해법은 Bodin 과 Golden (1981), Bodin, et.al (1983) 에서와 같이 크게 7가지 유형으로 분류된다.

- (1) 先분할-後경로 (cluster first-route second)
- (2) 先경로-後분할 (route first-cluster second)
- (3) 절약 또는 삽입 (savings or insertion)
- (4) 개선 및 교환 (improvement or exchange)
- (5) 수리계획법 (mathematical programming)
- (6) 대화식 최적화 (interactive optimization)
- (7) 정확한 해법 (exact procedures)

처음 4가지 방법과 맨 마지막 방법은 과거부터 널리 이용되었다. 나머지 두가지 방법은 비교적 최근에 개발된 개념들이다. Ball 과 Magazine (1981)은 발견적 기법들을 좀 더 일반적인 형태로 구분하였다.

先분할-後경로 방법은 우선 수요지점을 몇개의 group로 분할시킨 후, 두번째 단계로서 각 group에 대해 경제적인 경로를 설계하는 것이다. Gillet과 Miller (1974)는 단일차고 (single depot) 차량운행 경로문제를 풀기 위해서 이른바 “휩쓸음 방법 (sweep approach)”을 개발하였는데 해를 2단계의 절차를 통하여 구한다. 우선, 극좌표상에서 한 지점을 무작위로 선택하여 그 지점을 “씨앗지점 (seed node)”이라고 정하고 차고를 선회축으로 해서 차고와 “씨앗지점”을 연결한 선을 시계방향 또는 반시계방향으로 돌린다. 그 선이 휩쓸고 지나간 지점들은 하나의 경로에 하나씩 추가되는데, 그 경로에 포함된 수요지점의 전체물량이 차량 적재용량을 초과하지 않을 때까지 계속 휩쓸고 지나간다. 만일 적재용량을 초과하게 되면 맨 마지막 추가된 수요지점이 다음 경로의 “씨앗지점”이 된다. 이와 같은 절차를 계속하면 <그림 1>의 예에서와 같은 모든 수요지점들이 분할되어 몇개의 경로들에 모두 포함되게 된다.

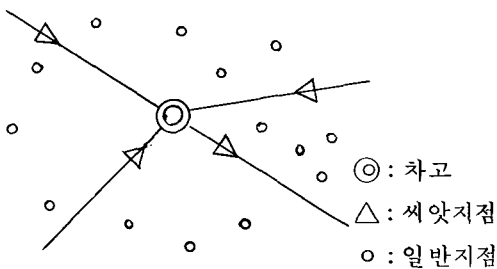


그림 1. 휩쓸음 (sweep) 절차에 의한 분할
일단 모든 경로구성이 끝나면, Lin (1965)

이 제시한 3-optimal 절차와 같은 TSP 해법을 적용하여 해를 개선한다. 이 휩쓸음 방법은 先분할-後경로 방법의 대표적 해법이다.

先경로-後분할 방법은 우선 수요지점을 포함하는 하나의 커다란 경로를 만든 후, 그 경로를 해가 가능한 작은 경로들로 분할시키는 방법으로서 Bodin과 Kursh (1978)이 개발하여 거리청소차 (street sweepers) 운행 문제에 적용하였다. Bodin과 Berman (1979)은 이 방법을 통학버스 (school bus) 운행 경로 및 시간계획 문제에 적용하였다.

절약방법 (savings algorithm)은 Clarke와 Wright (1964)가 차량운행 경로문제를 풀기 위해 개발한 방법이다. 처음에는 <그림 2>와 같이 각 수요지점이 별개의 차량에 의해서 각각 제품공급을 받는다고 가정한다. 그런데 만일 지점 i와 지점 j를 방문하는데 우리가 2대의 차량을 사용하는 대신에, <그림 3>과 같이 1대의 차량만 사용한다면, 우리는 운행거리에 있어서

$$(2d_{1i} + 2d_{1j}) - (d_{1i} + d_{1j} + d_{ij})$$

$$= d_{1i} + d_{1j} - d_{ij}$$

만큼의 절약 (savings) S_{ij} 를 얻게 된다. 만약 방향에 따라 거리가 다르다면, 절약은

$$S_{ij} = d_{1i} + d_{1j} - d_{ij}$$

가 된다.

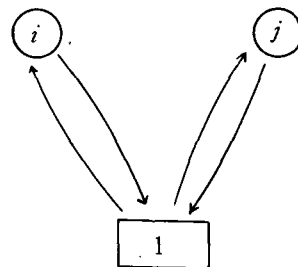


그림 2. 초기상태

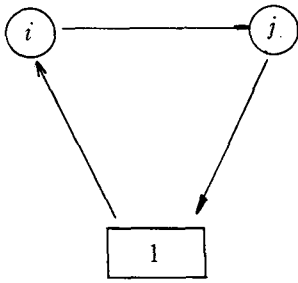


그림 3. node i와 j의 연결

연결가능한 각 경로의 끝점 i 와 j 에 대해서, 해당되는 절약 S_{ij} 가 있다. 우리는 이러한 절약을 내림차순으로 분류한 후, 그 분류된 목록의 맨 위에서부터 시작하여, 문제의 제약조건을 위배하지 않는다면 최대절약 S_{ij} 를 이루는 지점 i 와 j 를 연결한다.

Clarke와 Wright는 이 방법을 적재용량이 여러가지인 트럭의 운행문제에 적용하였다.

이 방법은 추후 개발된 대부분의 발전적 기법의 기본이 되었다.

Gaskell (1967), Webb (1972)는 해를 개선하기 위해 절약공식을 조금씩 변형하여 실험하였다. Gaskell은 경로를 형성할 때 한 경로를 완성한 후 다음 경로를 형성해 나가는 연속적 (sequential) 방법보다는 여러경로를 함께 형성해 가는 동시적 (concurrent) 방법이 통상 우수하다고 밝혔다.

Yellow (1970)는 배달지점을 극좌표 상에 나타냄으로써 Clarke와 Wright 방법에서 절약 (savings) file을 유지 보관할 필요성이 없게 하였다. Mole과 Jameson (1976)은 Clarke와 Wright의 절약공식을 일반화하여 새로운 연속적 경로형성방법을 개발하고, 동시적 경로형성방법과 비교한 후, 해가 개선 가능하다면 연속적 방법이 계산상 많은 이점이 있다고 주장하였다.

Beltrami (1974)는 차량적재용량 제한조건 외에, 여러개의 폐기물 처리장, 일일 또는 격일 수거 등을 고려해서 쓰레기 수거를 위한 방법을 제시하였다. 그는 Clarke와 Wright의 방법에 무작위 탐색 과정 (randomized search procedure)를 이용하면 좀 더 최적해에 가까운 해를 얻을 수 있음을 보였다.

Tillman과 Cain (1972)는 절약방법을 활용한 상한치 방법 (upperbound algorithm)을 개발하여 복수차고 문제에 적용하였다.

Golden et.al (1977)은 Clarke와 Wright 방법에 효율적인 자료구조 (data structure)를 사용함으로써 대형문제를 풀 수 있도록 하였으며, 복수차고문제에 대한 해법도 개발하였다. Golden과 Wong (1981)은 이 방법을 호에 용량제한이 있는 운행문제 (capacitated arc routing problem; CARP)에 적용하고, 박순달과 송성현 (1984)은 제품상차회수를 위해 방문했던 지점들을 역순으로 재방문하기 위한 역순 절약방법을 개발하였다. Chapleau et.al (1984)는 CARP문제의 해법으로서, 경로에 호를 삽입시키는 방법 (insertion procedure)을 제시하였다.

개선 또는 교환절차 (improvement or exchange procedure)는 매 단계마다 하나의 가능해가 전체비용이 적게 드는 다른 가능해로 바뀌게 되는데 이 절차는 더 이상 비용절감이 생기지 않을 때까지 반복한다. 대표적인 해법은 Lin (1965), Lin과 Kernighan (1973)이 TSP문제를 풀기 위해 개발한 가지교환기법 (branch exchange heuristic)으로서 K-optimal의 개념을 도입하였다. 이것은 일종의 국부탐색 (local search) 방식인데 K-optimal이란 기존의 경로에서 R개의 가지 (branch or link)를 어떻게 교환하더라도

해의 발전이 더 이상 없는 상태를 의미한다.

Lin은 TSP 문제에 3-optimal 교환방법을 적용하였을 때 거의 최적이며, 4-optimal 교환방법을 적용하더라도 해의 발전은 거의 없고 단지 계산량만 $O(N^3)$ 에서 $O(N^4)$ 으로 증가한다고 하였다. Papadimitriou와 Steiglitz (1977)가 국부탐색방법은 문제에 따라서 매우 열등한 해를 줄 수도 있다고 지적하였지만, 평균적 (average performance) 관점에서 볼때 3-optimal 교환방법은 가장 뛰어난 방법으로 평가되고 있다. 따라서 이 가지교환방법을 VRP 관련문제에 적용하려는 시도가 있었다.

Psaraftis (1983)는 방문순서 제약이 있는 운행문제 (precedence - constrained routing problem)에 이 방법을 수정 적용하였다.

Christofides와 Eilon (1969)은 차고 하나인 표준적 VRP 문제에 가지교환방법(2-optimal, 3-optimal)을 적용시켰는데, Mole (1979)은 활성적 제약조건이 많은 대형 VRP 문제에도 이 접근방법이 타당한지는 충분한 근거가 없음을 지적하였다.

Wren과 Holliday (1972)는 차량의 적재 용량과 경로별 최대연속 운행시간 제한조건이 있는 VRP 문제를 푸는 해법으로서, 우선 방위각을 사용하여 초기해를 구한 후, 7가지의 독특한 해 개선과정 (refining process)을 반복 수행하여 해를 구하는 방법을 제시하였고 이 방법을 복수차고문제에 확대적용하였다. Golden, et. al (1977)은 초기해를 개선하기 위한 방안으로서, 지점 j 를 현위치에서 다른 위치 즉 지점 i 뒤로 옮길 경우의 절약을 모든 지점 i, j 에 대하여 계산한 후 절약이 큰 것부터 점검하여 지점 j 의 삽입이 가능한 곳이 있으면 그 곳으로 위치를 옮기고, 그 다음 다

시 새로운 절약을 계산하여 해 개선이 가능할 때까지 위 과정을 반복 수행하는 사후처리 (post-processor) 방법을 제시하였다. 그런데 이 방법은 매번 절약행렬을 계산하여야 하는 번거로움이 뒤따른다.

수리계획법 접근방법 (mathematical programming)은 운행경로문제 (routing problem)에 내재해 있는 수리계획법 수식을 직접적으로 이용하는 방법이다. 대표적인 예는 Fisher와 Jaikumar (1981)의 접근방법이다. 그들은 Dantzig와 Ramser의 VRP 문제를 수리모형으로 정식화하고, 그 모형에서 2개의 상호연관된 요소를 발견하였다. 하나는 외관원 (travelling salesman or routing) 문제이고, 다른 하나는 일반화된 배정 문제 (generalized assignment or packing)이다. 그들의 발견적 기법은 이 두 문제가 이미 많이 연구되어 왔고, 그 해법들에 대한 수리계획법적 접근방법이 잘 개발되어 있다는 장점을 활용하고 있다. Christofides, Mingozzi와 Toth (1981 a)는 VRP 문제와 관련된 많은 조합최적화문제에서 하한값 (lower bounds)을 구하기 위한 동적계획법 방안을 제시하였으며, 또한 Christofides, et. al (1981 b)은 VRP 문제에 Lagrangian relaxation 절차를 이용하였다. 그리고 Cullen, et. al (1981)은 운행경로문제를 푸는데 set partitioning 모형을 이용하였으며, 개선된 해를 생성하기 위한 pricing mechanism을 개발하였다.

Desrosiers, et. al (1986, 1984)는 방문 지점에의 도착시간에 상하한이 주어져 있는 운행경로문제를 set partitioning 문제로 표현하고, 그 문제를 단체법과 분지한계법을 이용하여 풀었다. 그 때 set partitioning 문제에서 새로운 열 (column)은 마디 (node)

에 시간제약이 있는 최단경로 알고리즘에 의해 생성된다.

Foster 와 Ryan (1976) 은 차량의 적재용량이나 경로상 최대연속운행 시간의 제약조건이 있는 VRP 문제를 풀기 위한 해법으로서 수정단체법 (revised simplex method) 을 사용한 정수계획 접근방법 (integer programming approach) 을 개발했다.

대화식 최적화 (interactive optimization) 은 문제 해결과정에 인간과의 상호작용이 큰 비중을 차지하는 일반적인 목적의 접근 방법인데 Cullen, et.al (1981) 이 운행경로 (routing) 문제 해결에 사용하였다.

정확한 해 (exact solution) 를 주는 해법으로서 Christofides, et.al (1981 b) 은 적재용량과 차량경로의 최대운행거리를 제약조건으로 하여 총 운행거리를 최소화하려는 차량운행경로문제에 대해서 동적계획법을 이용한 나무형 탐색 (tree search) 기법을 제시하였다.

Laporte, et.al (1986, 1984) 은 적재용량 제약조건이 있는 VRP 문제와 차량경로의 최대운행거리제약조건이 있는 VRP 문제에 대해서 절단평면 (cutting plane) 법과 분지한계 (branch and bound) 법을 이용한 정확한 해법 (exact algorithm) 을 개발하였다. 또한 Laporte, et.al (1985) 는 적재용량과 운행거리제약이 있는 VRP 문제에 대해서 전술한 IP 기법 외에 subtour 를 제거하는 새로운 제약조건을 첨가하여 정확한 해를 구하는 방법을 제시하였다. 이 문제에 대해 박 순달과 송 성헌 (1983) 은 분지한계기법을 제시하였다.

이 외에도 TSP 관련문제에 대한 연구는 매우 활발하게 이루어져 왔는데, Dantzig (1954), Karg 와 Thompson (1970), Be-

llmore 와 Nemhauser (1968), Held 와 Karp (1970), Krolak, et.al (1971), Garfinkel (1973), Golden (1977 a), Crowder 와 Padberg (1980), Golden, et.al (1980) Kanellakis 와 Papadimitriou (1980), Jonker 와 Volgenant (1984) 등이 전형적인 TSP 문제 또는 대형 TSP 문제를 푸는 해법을 연구하였다. 1980 년대에 들어와서는 약간 변형된 TSP 문제에 대한 연구가 많이 있었다.

Cuttler (1980) 은 N-line Planar TSP 문제를, Baker (1983) 은 시간제약하에서의 TSP 문제를, Carpaneto (1984) 는 병목 (bottle neck) TSP 문제를 다루었으며, Ong (1982) 은 구매원문제 (traveling purchaser problem) 를 다루었다. TSP 문제에서 외관원 수가 여러명으로 되면 복수의관원문제 (MTSP) 가 되는데, Bellmore 와 Hong (1974), Svestka 와 Huckfeld (1978) 은 MTSP 모형으로 변형시킴으로서 TSP 해법으로 풀 수 있음을 보였으며, Garcia-Diaz (1985) 는 MTSP의 해법으로서 발견적인 순환네트워크 (circulation network) 방법을 제시하였다.

그리고 또한 Lenstra 와 Rinnooy Kan (1976), Male, et.al (1977), Orloff (1974 a, b, 1976 a, b), Orloff 와 Caprera (1976) 은 경로상에 있는 마다 (node) 와 호 (arc) 를 함께 경유해야 하는 일반운행문제 (general routing problem) 에 대한 연구를 하였다.

Dror 와 Trudeau (1986) 은 수요가 불확정적인 차량운행문제 (stochastic vehicle routing problem) 에 대하여 Clarke 와 Wright 의 절약방법을 수정한 해법을 제시하였다.

Christofides 와 Beasley (1984) 는 주어진 몇일간에 걸쳐 고객에 대한 서비스 수준

을 충족시키고 분배비용을 최소화하기 위한 차량 운행경로를 찾는 기간운행문제 (period routing problem)에 대해 연구하고, 교환 절차 (interchange procedure)에 의한 해법을 제시하였는데, Russel과 Igo (1979)는 이 문제는 배정운행문제 (assignment routing problem)이라고 명명하였다.

1970년대 후반에 들어서서는 발전적 해법의 성능을 분석하는 연구가 있었는데, Rosenkrantz (1977), Frieze, et.al (1982), Ong과 More (1984)는 TSP 문제에 대한 몇가지 발전적 해법들에 대해 그 성능을 분석하였다. VRP 문제의 해법에 대해서는 Golden (1977b), Stein (1978), Haimovich와 Rinnooy Kan (1985)이 분석하였다.

최근에는 VRP 모형의 결과를 분배 관리시스템 (distribution management system)에서 더 높은 수준 (higher-level)의 의사결정문제와 결부시킴으로서 더욱 효율적인 분배관리를 하기 위한 노력이 일고 있다.

Federgruen과 Lageweg (1980)은 운행비용 (routing cost)를 고려한 계층적 분배모형 (hierarchical distribution model)을 연구하였으며, Dempster, et.al (1981)은 VRP 모형이 계층적 계획 시스템 (hierarchical planning system)의 한 예가 됨을 보이고, 그 시스템을 평가하는 방안을 제시하였다. Federgruen과 Zipkin (1984)는 재고배분문제 (inventory allocation problem)과 결합된 차량운행문제를 다루었으며, Spaccamela, et.al (1984)는 고객에 대한 정보가 불완전한 상태에서 구입해야 할 차량수를 결정해야 하는 계층적 차량운행문제 (hierarchical vehicle routing problem)를 다루었다.

Burn, et.al (1985)는 수송비용과 재고

비용을 최소화하는 전략을 제시하였다. 그리고 Daganzo와 Newell (1986)은 수송비용과 재고비용을 최소로 하기 위해서 분배시스템 설계에 관한 연구를 하였다.

Laporte와 Nobert (1981)은 n 개의 지점 중 한 지점이 차고 (depot)가 되도록 결정하는데 있어서 운행비 및 운영비 (routing and operation costs)를 최소화하는 기법을 제시하였다.

또한 Ball, et.al (1984)는 도시 대중수송시스템을 위한 차고입지 문제를 다루었는데, 그는 위치교환방법 (location interchange heuristic)과 네트워크 흐름방법 (network flow-based algorithm)을 반복 적용하는 해법을 개발하였다.

3. 차량운행시간계획문제 (Vehicle Scheduling Problem)

차고가 하나인 차량운행시간계획문제 (single depot vehicle scheduling problem: VSP)는 무환 네트워크 (acyclic network)에서 마디들 (nodes)을 어떤 비용함수가 최소가 되도록 일단의 경로 (paths)로 분할하는 것이다. 여기서 마디 (node)는 단위 업무 (task)를 뜻하며, 경로 (path)는 하나의 차량이 수행할 업무순서를 뜻한다.

필요한 차량수와 경로수 (number of paths)가 같다면, 경로수를 효과적으로 줄이려 하는 목적함수는 자본비용을 줄이게 된다. 만일 각 호 (arc)에 해당되는 공차운행시간 (dead head time)을 무게 (weight)로 설정하면, 운영비 (operating cost)는 총 운행시간과 비례하므로 총 호의 무게를 효과적으로 줄이려 하는 목적함수는 운영비를 줄이게 된다.

<그림 4>는 일단의 업무 (tasks)와 차량운

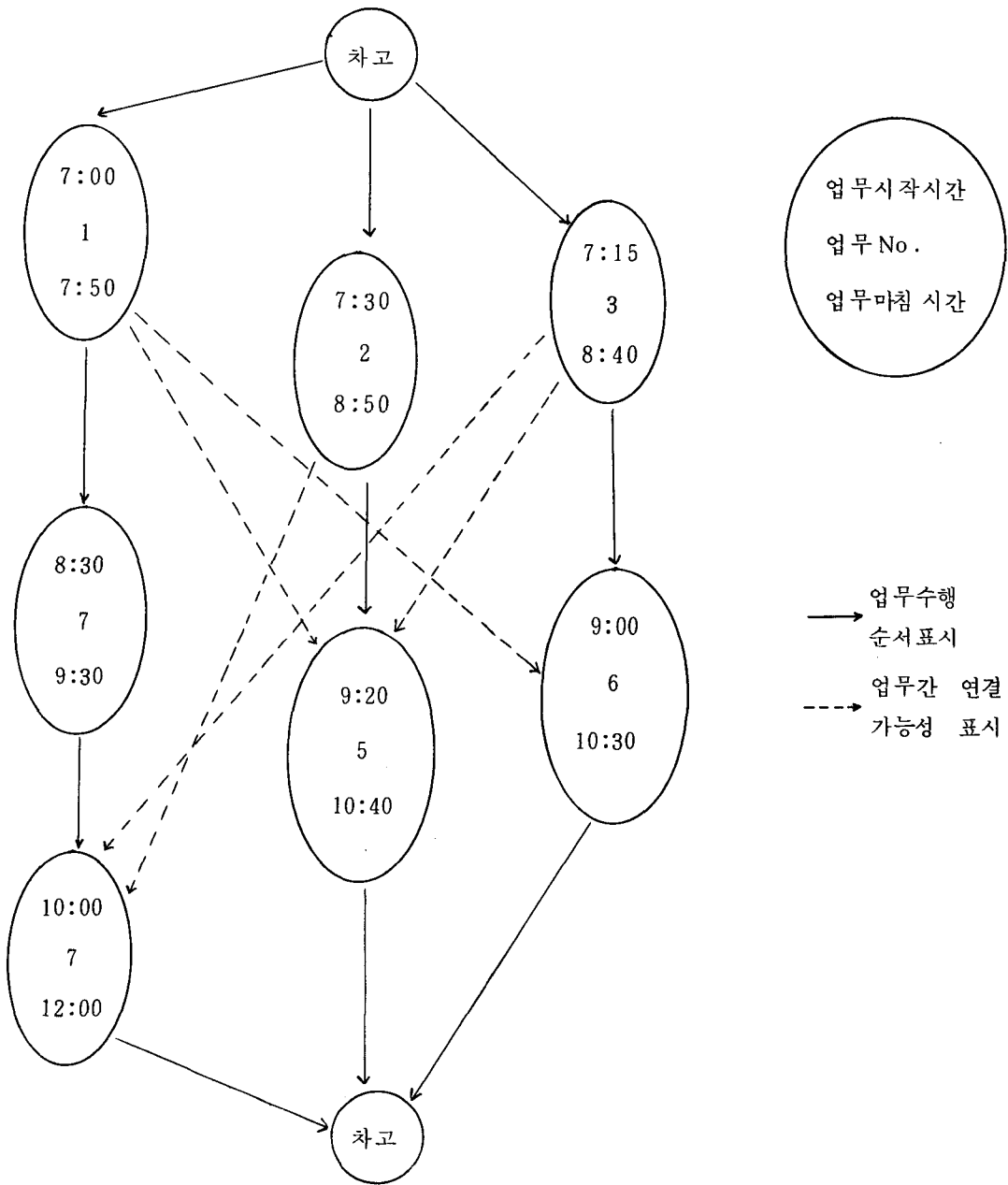


그림 4. 차량운행시간계획 (vehicle schedules)

행시간 계획문제를 대한 하나의 해를 보여 주고 있다.

차고가 하나인 차량운행시간계획문제(VSP)에 다음과 같은 제약조건이 첨가되면, 문제의 복잡도는 가중된다. 즉 재급유나 정비 등을 위

해 차량이 차고로 돌아올 때까지의 경로별 최대운행시간 또는 거리 제약이 있는 경우, 업무에 따라 특정 차종의 차량이 수행해야 하는 경우, 차고가 여러개 있는 경우 등이다.

VSP 문제는 적절히 정의된 네트워크에서

최소비용흐름문제 (minimum cost flow problem)으로 수식화 할 수 있어서, 효율적으로 최적해를 구할 수 있지만, 상기 제약조건들이 첨가되면, Lenstra와 Rinnooy Kan (1981)이 지적했듯이 NP-hard 부류의 문제가 되므로 풀기가 어렵게 된다.

Ball, et. al (1983)는 차고가 여러개인 경우나 차종이 여러가지인 경우의 문제를 다상품흐름문제 (multicommodity flow problem)로 수식화 하였는데 해법으로는 4가지 발견적 기법을 소개하였다.

- (1) 경로동시형성 (concurrent scheduler)
- (2) 先분할-後순서 (cluster first - schedule second)
- (3) 先순서-後분할 (schedule first - cluster second)
- (4) 교환 (interchange) 방법

경로동시형성 방법은 1978년 Bodin, Rosenfeld와 Kydes가 제시한 직관적인 방법으로서 제약조건이 다양한 차량운행시간계획문제를 푸는데 실제적으로 매우 유용하다. 그들의 절차는 아래와 같다.

단계 1. 업무를 시작시간 순으로 분류한다. 시작시간이 가장 빠른 업무1을 차량1에 배정한다.

단계 2. 업무K에 대해 다음과 같이 처리한다. 만일 업무K가 기존 차량에 배정가능하다면, 공차운행시간이 가장 짧게 걸릴 차량에 업무K를 배정한다. 그렇지 않으면 새로운 차량에 업무K를 배정한다.

단계 2를 모든 업무에 대해 적용한다.

제약조건을 만족하는지는 단계 2에서 점검한다. 특히 차고가 여러군데 있을 경우, 단계 2에서 새로 생성되는 차량은 가장 인접한 차고에 배정된다. 이 기법은 코드화가 용이하고

계산상 효율적이기 때문에 다른 해법의 초기해를 만드는 데에도 유용하다.

先분할-後순서 방법과 先순서-後분할 방법은 차량운행경로문제 (vehicle routing problem)에 대한 先분할-後경로 방법 및 先경로-後분할 방법과 개념적으로 유사한 것으로서 Bodin과 Golden(1981), Carraresi와 Gallo(1984)에 잘 설명되어 있다.

교환 (interchange) 방법은 TSP 문제에 대한 Lin(1965)의 2-optimal 기법의 응용이라고 말할 수 있는데, 초기해는 앞서 기술한 경로동시형성방법 등을 사용하여 구할 수 있다. Smith와 Wren(1981)은 VAMPIRES와 TASC라는 버스운행시간계획 프로그램을 만들는데 이 기법을 적용하였다.

Carraresi와 Gallo(1984)는 네트워크 모형을 이용한 해법을 소개하였는데 차고 하나만 있는 간단한 VSP 문제는 배정문제나 최소비용흐름 문제의 해법을 이용하면 쉽게 해를 구할 수 있음을 보였으며, Ball, et. al (1983)은 짝짓기 문제 (matching problem)의 해법을 이용한 발견적 기법을 제시하고 대중교통차량의 운행시간계획작성에 적용하였다.

또한 Cheshire, et. al (1982)는 VSP 문제에 대한 쌍대발견적 기법 (dual heuristic)을 제시하였다.

Hall(1985)는 경로 도중 차량이 무작위로 지연될 때 수송 종착점에의 차량도착시간계획을 세우는 간단한 모형을 개발하고 그 모형을 평가하였다.

4. 차량운행경로 및 시간계획문제 (vehicle routing and scheduling problem)

차량운행경로문제와 시간계획문제가 결부된

문제들은 차량에 따라 구분할 수 있다. 즉 통학버스 (school bus) 운행경로 및 시간계획문제, 트랙터-트레일러 (tractor-trailer) 운행경로 및 시간계획문제, dial-a-ride 운행경로 및 시간계획문제, 거리청소차 (street sweepers)와 쓰레기차 (refuse collection vehicles)의 운행경로 및 시간 계획문제, 비행기 운행시간계획문제 (airplane scheduling problem) 등이 있다. 이들 문제들의 대부분의 선행관계 (precedence relationships)나 방문시간 상하한 (time window)이 있다.

Lenstra와 Rinnooy Kan (1981)이 지적했듯이 이들 문제 모두는 NP-hard이다. 대부분의 경우 이 문제들은 복잡해서 수리계획법 수식에 의한 정확한 알고리즘 (exact algorithmic) 접근방법이 성공적이라는 것이 입증되지는 못했다.

Bodin과 Berman (1979)은 통학버스 운행경로 산정방법 뿐만 아니라 학교들의 시작과 종료시간이 분명한 시점에 있을 경우, 예를 들면 오전 7:30, 오전 8:00, 오전 8:30, 오전 9:00 등으로 명확히 구분될 경우, 매일매일의 버스 운행시간계획을 세우는 절차를 논의했다.

Swersey와 Ballard (1984)는 특정학교에의 도착시간에 상하한 값이 주어지는 경우로 좀 더 일반화시킨 통학버스 운행시간 계획문제에 대해 2가지 정수계획수식모형을 제시하고 선행계획법에 의해 기초한 해법을 보여줬다.

Y.M. Choi (1984)는 분적 (partial load) 도착시간 상하한 (time window)과 체류시간 (dwell time)이 있는 경우의 단일 차량트레일러 (single vehicle trailer) 운행경로 및 시간계획문제를 다루었는데, 그는 수학적 모형에 Bender's decomposition 방법을 적용하여 문제를 2가지로 분할 처리하였다. 하

나는 운행경로 주문제 (routing master problem)와 다른 하나는 운행시간 계획 부문제 (scheduling subproblem)이다.

Psarafitis (1983 b)은 방문시간 상하한 (time windows)이 있는 경우, 단일 차량이 이곳 저곳 여러곳을 움직이는 dial-a-ride 문제에 대해 최적해를 얻기 위한 동적 계획법 (dynamic programming) 방법을 개발하였다. 그의 방법을 이용하면 고객수가 8-10명 정도의 문제의 해를 효율적으로 구할 수 있다. 그 외에 Psarafitis (1983 a)은 선행관계 제약이 있는 운행경로 문제에 대해 k-optimal 교환방법의 개념을 이용한 기법도 개발했다. 이 외에도 장 병만과 박 순달 (1984, 1985)은 항공기 운행계획 및 승무계획문제에 대한 발견적 기법을 제시하였고, Sexton과 Bodin (1985)이 배달요구 시각이 정해져 있는 다지점 간의 단일 차량운행문제에 대한 해법을 제시하였다.

이 분야에 대한 발견적 해법을 분석한 연구는 Psarafitis (1983 a)와 Solomon (1986)이 하였다.

5. 추후 연구 방향

앞 절에서는 차량운행경로문제, 차량운행시간계획문제, 그리고 차량운행경로 및 시간계획문제에 관하여 지금까지 연구되어 왔던 많은 다양한 내용들을 개괄적으로 기술하였다. 실제로 연구된 논문들은 훨씬 더 많으나, 여기서 수록된 논문들은 그 중에서 대표되는 것들을 망라한 것이라 할 수 있다. 그리고 그러한 연구에서 다루어진 문제들의 기원을 살펴보면 일부는 이론적인 것들이지만 나머지는 실제 응용분야에서 파생된 것들이다. 어떤 문제들은 수리모형으로 잘 표현되기도 하지만,

어떤 문제들은 너무 복잡해서 산뜻하고 간결한 수식이 개발되지 못한 것도 있다. 또한 그 외 문제들에 대해서는 현재의 해법을 더 개선할 여지가 많이 있다.

서두에서 언급한 바있는 배차특성 요인을 살펴보면, 아직도 미개척된 차량 운행경로및 시간계획문제가 많이 있음을 알 수 있다. 따라서 새로운 연구영역이 확대되어 갈 것으로 기대된다. 향후에도 이론적인 측면과 실용적인 측면의 양면적인 연구가 계속 이루어질 것이고, 좀 더 좋은 포괄적인 수식모형과 해법이 발전되어 갈 것이다.

앞으로 연구해야 할 과제와 방향을 세분하여 기술하면 다음과 같다.

(1) 범용성 배차 소프트웨어 시스템의 개발

현재 많은 조직체들은 배차업무를 전산화함으로써 비용절감을 이룩할 수 있음을 깨닫기 시작했으며, 컴퓨터의 가격은 떨어지고, 소형 컴퓨터의 계산능력이 커감에 따라 배차업무의 전산화가 경제적인 시점에 와 있다. 만일 적절한 배차소프트웨어가 있다면, 작은 조직체들도 배차업무를 전산화하려고 할 것이다. 그렇지만 Bodin, et.al (1983) 이 지적했듯이 차량운행경로 및 시간계획 모형을 활용하는데의 주요약점은 효율적인 범용성 배차 소프트웨어가 빈약하다는 것이다. 오늘날 단일차고 차량운행경로문제를 풀기 위한 IBM 배차프로그램 (Vehicle Scheduling System) 패키지나 대중교통 승무원 승무계획을 위한 RUCUS 시스템 같은 대부분의 범용성 시스템은 크게 두가지 단점이 있다.

i) 특수 문제상황과 추가적인 제약조건을 다루기가 곤란하고

ii) 사용자(user)가 다루기에 데이터베이스(data-base) 시스템이 적절하지 못하다.

따라서 이러한 점들을 보강해서, 미래에 개발할 범용성 소프트웨어 시스템은

i) 사용자가 대화식으로 융통성있게 대처할 수 있어야 하고

ii) 이해하고 다루기 쉬운 데이터베이스 시스템을 갖추어야 할 것이다.

(2) 새로운 문제에 대한 연구

분배활동에 관련된 조직체들은 제약조건, 비용구조, 그리고 업무수행평가기준(performance criteria)이 기존문제들과 다른 새로운 문제들을 계속 접하게 된다. 이러한 문제들은 새로운 수리모형, 새로운 해법 그리고 새로운 컴퓨터 프로그램의 개발을 필요로 하고 있다.

(3) 수리모형에 관한 연구

운영경로와 시간계획문제(routing and scheduling problem)들은 그 문제의 출력사항이 경로와 시간계획이기 때문에, 그 출력사항만 갖고서는 많은 다양한 문제들끼리 구분할 수 없다. 각 문제들 간의 차이는 모형의 가정과 필요한 입력사항의 성격에 있다. 복잡한 실제 세계의 문제를 모형화하는데 따른 가정과 그 모형의 역할은 문제 푸는 해법 만큼이나 중요하다. 또한 모형의 수식에 따라 해법이 달라질 수 있다. 따라서 이 모형에 대한 수리적인 연구가 기대된다.

(4) 해법에 관한 연구

1) 정확한 해(exact algorithms)

외판원문제를 제외한 NP-hard의 운행경로 및 시간계획문제들에 대해서는 정확한 해를 개발하려는 노력이 극히 제한적이었다. 따라서 앞으로 더 많은 연구가 있어야 할 것이다.

2) 발견적 기법(heuristic algorithms)

배차문제에 대한 대부분의 해법은 발견적인

(heuristic) 것이며, 그것이 최적이라고 보장할 수 없다. 그렇지만 배차문제의 내재적인 복잡성과 현실에서 접하는 문제의 크기 때문에 발견적 기법은 앞으로도 계속 지배적인 해법이 될 것이다. Ball 과 Magazine (1981) 이 지적했듯이 이 발견적 기법은 다음과 같은 방향으로 연구가 지속되어야 할 것이다.

가. 수리계획법적 발견적 기법

나. 분석

기법의 성능은 실험적 연구외에도 최악의 상황 (worst-case) 분석, 확률적 (probabilistic) 분석, 통계적 (statistical) 분석을 통하여 분석될 수 있다.

다. 특정 응용분야에서 발생하는 실제 자료에 의한 발견적 기법들의 성능비교

라. 인간과 기계간의 대화식 발견적 기법의 개발

(5) 차량운행경로 및 시간계획문제와 분배관리 시스템에서의 더 높은 수준의 의사결정 문제를 결합시킨 복합된 문제에 대한 연구

이 분야에 대한 기존의 연구내역은 2절의 후미에 기술한 바와 같다.

효율적인 분배관리를 하기 위해서는 분배에 대한 장기계획 (planning) 을 수립하는 시점에서 차량운행경로 및 시간계획을 함께 고려하는 것이 바람직하다. 설비위치, 집중화 및 분산화, 구역화 등의 결정은 운행경로 및 시간계획의 세부모형을 이용함으로써 더욱 바람직한 결과를 얻을 수 있을 것이다. 1980년대에 들어와서 운행경로 및 시간계획 모형의 결과를 더 높은 수준의 문제 즉 설비입지, 재고관리 등의 문제와 결부시킨 연구가 새로운 연구영역을 형성하게 되었으며, 앞으로도 이 분야에 대한 연구가 계속될 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. 박순달, 송성현, 조성준. 1984. 제품배달 배차문제. 대한산업공학회지. 10: 47-53.
2. 박순달, 송성현. 1984. 제품배달 배차를 위한 발견적 기법. 한국군사운영분석학회지. 10: 41-55.
3. 박순달, 송성현. 1983. 최적 차량운행을 위한 분지한계기법. 한국군사운영분석학회지. 9: 75-85.
4. 장병만, 박순달. 1985. 복수모기지의 항공기 운항계획 및 승무계획문제의 발견적 기법. 대한산업공학회지. 11: 155-163.
5. 장병만, 박순달. 1984. 복수의관원모형과 절약기법에 의한 승무계획문제의 해법. 한국 OR 학회지. 9: 25-35.
6. Abel, D.J., K.P. Stark, C.R. Murry and Y.M. Demoulin. 1981. A Routing and Scheduling Problem for a Rail System: A Case Study. J. Opl. Res. Soc. 32: 767-774.
7. Baker, E.K. 1983. An Exact Algorithm for the Time-Constrained Traveling Salesman Problem. Oper. Res. 31: 938-945.
8. Baker, E.K., L.D. Bodin and R.J. Ponder. 1979. Efficient Heuristic Solutions to an Airline Crew Scheduling Problem. AIIE Transactions. 11: 79-85.
9. Balinski, M.L. and R.E. Quandt. 1964. On an Integer Program for a Delivery Problem. Operational Research. 12: 300-304.
10. Ball, M., A. Assad, L. Bodin and B. Golden. 1984. Garage Location for an Urban Mass Transit System. Transportation Sci. 18: 56-75.

11. Ball, M., L. Bodin and R. Dial. 1983. A Matching Based Heuristic for Scheduling Mass Transit Crews and Vehicles. *Transportation Sci.* 17: 4-31.
12. Bellmore, M. and S. Hong. 1974. Transformation of Multisaleman Problem to the Standard Traveling Salesman Problem. *J. of the Association for Computing Machinery.* 21: 500-504.
13. Bellmore, M. and G.L. Nemhauser. 1968. The Traveling Salesman Problems: A Survey. *Opnl Res.* 16: 538-558.
14. Beltrami, E.J. 1977. Models for Public Systems Analysis. Academic Press. 140-156.
15. Beltrami, E.J. and L.D. Bodin. 1974. Networks and Vehicle Routing for Municipal Waste Collection. *Networks.* 4: 65-94.
16. Bodin, L. and B. Golden. 1981. Classification in Vehicle Routing and Scheduling. *Networks.* 11: 97-108.
17. Bodin, L., B. Golden., A. Assad and M. Ball. 1983. Routing and Scheduling of Vehicles and Crews. *The State of the Art. Comput. Ops. Res.* 10: 69-211.
18. Bokinge, U. and D. Hasselstrom. 1980. Improved Vehicle Scheduling in Public Transport through Systematic Changes in the Time-Table. *European Journal of Operational Research.* 5: 388-395.
19. Booler, J.M.P. 1980. The Solution of a Railway Locomotive Scheduling Problem. *J. Opl Soc.* 31: 943-948.
20. Brown, G.G and G.W. Graves. 1981. Real-Time Dispatch of Petroleum Tank Trucks. *Management Science.* 27: 19-32.
21. Burns, L.D., R.W. Hall, D.E. Blumenfeld and C.F. Daganzo. 1985. Distribution Strategies that Minimize Transportation and Inventory Costs. *Oper. Res.* 33: 469-490.
22. Carpaneto, g., S. Martello and P. Toth. 1984. An Algorithm for the Bottleneck Traveling Salesman Problem. *Ops. Res.* 32: 380-389.
23. Carraresi, P. and G. Gallo. 1984. Network Models for Vehicle and Crew Scheduling. *Euro. J. Opnl. Res.* 16: 139-151.
24. Chapleau, L., A. Ferland, G. Lapalme and J. Rousseau. 1984. A Parallel Insert Method for the Capacitated Arc Routing Problem. *Ops. Res. Letters.* 3: 95-99.
25. Cheshire, I M., A.M. Malleson and P.F. Naccache. 1982. A Dual Heuristic for Vehicle Scheduling. *Opnl. Res. Soc.* 33: 51-61.
26. Choi Y.M. 1984. The Single Vehicle Trailer Routing and Scheduling Problem with Partial Loads, Time Windows and Dwell Times. Ph. D. Thesis. State University of New York at Stony Brook, NY.
27. Christofides, N. and J.E. Beasley. 1984. The Period Routing Problem. *Networks.* 14: 237-256.
28. Christofides, N. and S. Eilon. 1969. An Algorithm for the Vehicle-dispatching Problem. *Ops. Res.* 20: 309-318.
29. Christofides, N., A. Mingozzi. and P. Toth. 1981a. State-Space Relaxation Procedures for the Computation of Bounds to Routing Problems. *Networks.* 11: 145-164.
30. Christofides, N., A. Mingozzi. and P. Toth.

- 1981b. Exact Algorithm for the Vehicle Routing Problem, Based on Spanning Tree and Shortest Path Relaxations. *Math. Prog.* 20: 255-282.
31. Christofides, N., A. Mingozzi. and P. Toth. 1979. The Vehicle Routing Problem. *Combinatorial Optimization.* 11: 315-338.
 32. Clarke, G. and J.W. Wright. 1964. Scheduling of Vehicles from a Central Dept to a Number of Delivery Points. *Ops. Res.* 12: 568-581.
 33. Crowder, H. and M.W. Padberg. 1980. Solving Large-Scale Symmetric Travelling Salesman Problems to Optimality. *Management Sci.* 5: 495-679.
 34. Cullen, F.H., J.J. Jarvis and H.D. Ratiff. 1981. Set Partitioning Based Heuristics for Interactive Routing. *Networks.* 11: 125-143.
 35. Cutler, M. 1980. Efficient Special Case Algorithm for the N-Line Planar Traveling Salesman Problems. *Networks.* 10: 183-195.
 36. Daganzo, C.F. and G.F. Newell. 1986. Configuration of Physical Distribution Networks. *Networks.* 16: 113-132.
 37. Dantzig, G.B. and J.H. Ramser. 1959. The Truck Dispatching Problem. *Management Sci.* 6: 80-91.
 38. Dantzig, G., R. Fulkerson and S. Johnson. 1954. Solution of a Large-Scale Traveling-Salesman Problems. *Ops. Res.* 2: 393-410.
 39. Dempster, M.A.H., M.L. Fisher., L. Jansen., B.J. Lageweg., J.K. Lenstra. and A.H.G. Rinnooy Kan. 1981. Analytical Evaluation of Hierarchical Planning Systems. *Ops. Res.* 29: 707-716.
 40. Desrosiers, J., F. Soumis, M. Desrochers and M. Sauve. 1986. Methods for Routing with Time Windows. *Euro. J. Opnl. Res.* 23: 236-245.
 41. Desrosiers, J., F. Soumis, M. Desrochers and M. Sauve. 1984. Routing with Time Windows by Column Generation Networks. 14: 545-565.
 42. Dror, M. and P. Trudeau. 1986. Stochastic Vehicle Routing with Modified Savings Algorithm. *Euro. J. Opnl. Res.* 23: 228-235.
 43. Federgruen, A. and B.J. Lageweg. 1980. Hierarchical Distribution Modelling with Routing Costs. Report BW 17 Mathematisch Centrum, Amsterdam.
 44. Federgruen, A. and P. Zipkin. 1984. A Combined Vehicle Routing and Inventory Allocation Problems. *Ops. Res.* 32: 1019-1037.
 45. Fisher, M.L. and R. Jaikumar. 1981. A Generalized Assignment Heuristics for Vehicle Routing. *Networks.* 11: 109-124.
 46. Ford, L.R. and E. Fulkerson. 1962. Dilworth's Chain Decomposition Theorem for Partially Ordered Sets. *Flows in Networks.* Princeton University Press, New Jersey.: 61-65.
 47. Foster, B.A. and D.M. Ryan. 1976. An Integer Programming Approach to the Vehicle Scheduling Problem. *Oper. Res. Quarterly.* 27: 367-384.
 48. Frieze, A.M., G. Galbiati. and F. Maffioli. 1982. On the Worst-Case Performance of

- Some Algorithms for the Asymmetric Traveling Salesman Problem. *Networks*. 12: 23-39.
49. Garcia-Diaz, A. 1985. A Heuristic Circulation-Network Approach to Solve the Multi-Traveling Salesman Problem. 15: 455-467.
 50. Garfinkel, R.S. 1973. On Partitioning the Feasible Set in a Branch-and-bound Algorithm for the Asymmetric Traveling Salesman Problem. *Oper. Res.* 21: 340-343.
 51. Gaskell, T.J. 1967. Bases for Vehicle Fleet Scheduling. *Oper. Res. Q.* 18: 281-295.
 52. Gavish, B. 1976. A Note on "The Formulation of the M-Salesman Traveling Salesman Problem". *Management Sci.* 22: 704-705.
 53. Gillett, B.E. and L.R. Miller. 1974. A Heuristic Algorithm for the Vehicle-Dispatch Problem. *Oper. Res.* 23: 340-349.
 54. Golden, B.L. 1977a. A Statistical Approach to the TSP. *Networks*. 7: 209-225.
 55. Golden, B.L. 1977b. Evaluating a Sequential Vehicle Routing Algorithm. *AIIE Transactions* 9: 204-208.
 56. Golden, B., L. Bodin, T. Doyle and W. Stewart, JR. 1980. Approximate Traveling Salesman Algorithms. *Oper. Res.* 28: 694-711.
 57. Golden, B.L. and T.L. Magnanti. 1977. Deterministic Network Optimization: A Bibliography. *Networks* 7: 149-183.
 58. Golden, B.L., T.L. Magnanti and H.Q. Nguyen. 1977. Implementing Vehicle Routing Algorithms. *Networks* 7: 113-148.
 59. Golden, B.L. and R.T. Wong. 1981. Capacitated Arc Routing Problems. *Networks*. 11: 305-315.
 60. Green, L. and P. Kolesar. 1984. The Feasibility of One-Officer Patrol in New York City. *Management Sci.* 30: 964-981.
 61. Haimovich, M. and A.H.G. Rinnooy Kan. 1985. Bounds and Heuristics for Capacitated Routing Problems. *Math. Ops. Res.* 10: 527-542.
 62. Hall R.W. 1985. Vehicle Scheduling at a Transportation Terminal with Random Delay en Route. *Transportation Sci.* 19: 308-320.
 63. Held, M. and R.M. Karp. 1970. The Traveling-Salesman Problem and Minimum Spanning Trees. *Oper. Res.* 18: 1138-1162.
 64. Ichimori, T.H. Ishii. and T. Nishida. 1981. Routing a Vehicle with Limitation of Fuel. *J. Ops. Res.* 24: 277-281.
 65. Jonker, R. and T. Volgenant. 1984. Non-optimal Edges for Symmetric Traveling Salesman Problems.: 837-847.
 66. Kanellakis, P. and C.H. Papadimitriou. 1980. Local Search for the Asymmetric Traveling Salesman Problem. *Ops. Res.* 28: 1087-1099.
 67. Karg, R.L. and G.L. Thompson. 1964. A Heuristic Approach to Solving Traveling Salesman Problems. *Management Sci.* 10: 225-248.
 68. Krolak, P., W. Felts and G. Marble. 1971. A Man-Machine Approach Toward Solving the Traveling Salesman Problem. *Commun. ACM.* 14: 327-334.

69. Laporte, G., M. Desrochers and Y. Nobert. 1984. Two Exact Algorithms for the Distance-Constrained Vehicle Routing Problem. *Networks*. 14: 161-172.
70. Laporte, G., H. Mercure and Y. Nobert. 1986. An Exact Algorithm for the Asymmetrical Capacitated Vehicle Routing Problem. *Networks*. 16: 33-46.
71. Laporte, G. and Y. Nobert. 1981. An Exact Algorithm for Minimizing Routing and Operating Cost in Depot Location. *Euro. J. Opnl. Res.* 6: 224-226.
72. Laporte, G., Y. Nobert and M. Desrochers. 1985. Optimal Routing under Capacity and Distance Restrictions. *Ops. Res.* 33: 1050-1073.
73. Lenstra, J.K. and A.H.G. Rinnooy Kan. 1981. Complexity of Vehicle Routing and Scheduling Problems. *Networks*. 11: 221-227.
74. Lenstra, J.K. and A.H.G. Rinnooy Kan. 1976. On General Routing Problems. *Networks*. 6: 273-280.
75. Lind, S. 1965. Computer Solutions of the Traveling Salesman Problems. *Bell System Tech. J.* 44: 2245-2269.
76. Lin, S. and B.W. Kernighan. 1971. An Effective Heuristic Algorithm for the Traveling-Salesman Problems. *Ops. Res.* 21: 498-517.
77. Magnanti, T.L. 1981. Combinatorial Optimization and Vehicle Fleet Planning: Perspective and Prospects. *Networks*. 11: 179-213.
78. Male, J.W., J.C. Liebman, and C.S. Orloff. 1977. An Improvement of Orloff's General Routing Problem. *Networks*. 7: 89-92.
79. Marsten, R.E. and M.R. Muller. 1980. A Mixed-Integer Programming Approach to Air Cargo Fleet Planning. *Management Sci.* 26: 1096-1107.
80. Mole, R.H. 1979. A Survey of Local Delivery Vehicle Routing Methodology. *J. Opl Res. Soc.* 30: 245-252.
81. Mole, R.H. and S.R. Jameson. 1976. A Sequential Route-building Algorithm Employing a Generalised Savings Criterion. *Opl Res. Quart.* 27: 503-511.
82. Murty, K.G. and C. Perin. 1982. A 1-Matching Blossom-Type Algorithm for Edge Covering Problems. *Networks*. 12: 379-391.
83. Norback, J.P. and R.F. Love. 1977. Geometric Approaches to Solving the Traveling Salesman Problems. *Management Sci.* 23: 1208-1223.
84. Ong, H.L. 1982. Approximate Algorithms for the Travelling Purchaser Problem. *Oper. Res. Letters*. 1: 201-205.
85. Ong, H.L. and J.B. Moore. 1984. Worst-Case Analysis of Two Travelling Salesman Heuristics. *Oper. Res. Letters*. 2: 273-277.
86. Orloff, C.S. 1976a. On General Routing Problems: Comments. *Networks*. 6: 281-284.
87. Orloff, C.S. 1976b. Route Constrained Fleet Scheduling. *Transportation Sci.* 10: 149-168.
88. Orloff, C.S. 1974a. A Fundamental Problem in Vehicle Routing. *Networks*. 4: 35-64.

89. Orloff, C.S. 1974b. Routing a Fleet of M Vehicles to/from a Central Facility. *Networks*. 4: 147-162.
90. Orloff, C.S. and D. Caprera. 1976. Reduction and Solution of Large Scale Vehicle Routing Problems. *Transportation Sci.* 10: 361-373.
91. Oum, T.H. 1979. A Cross Sectional Study of Freight Transport Demand and Rail-Truck Competition in Canada. *The Bell Journal of Economics*. 10: 463-482.
92. Papadimitriou, C.H. and K. Steiglitz. 1977. On the Complexity of Local Search for the Traveling Salesman Problem. *SIAM J. Comput.* 6: 76-83.
93. Picard, J.C. and M. Queyranne. 1978. The Time-Dependent Traveling Salesman Problem and Its Application to the Tardiness Problem in One-Machine Scheduling. *Oper. Res.* 26: 86-110.
94. Psaraftis, H.N. 1983a. Analysis of an $O(N^2)$ Heuristic for the Single Vehicle Many-to-Many Euclidean Dial-a-Ride Problem. *Transpn Res.* 17: 133-145.
95. Psaraftis, H.N. 1983b. K-Interchange Procedures for Local Search in a Precedence-Constrained Routing Problem. *European Journal of Oper. Res.* 13: 391-402.
96. Psaraftis, H.N. 1983c. An Exact Algorithm for the Single Vehicle Many-to-Many Dial-a-Ride Problem with Time Windows. *Transportation Sci.* 17: 351-357.
97. Psaraftis, H.N. 1980. A Dynamic Programming Solution to the Single Vehicle Many-to-Many Immediate Request Dial-a-Ride. *Transportation Sci.* 14: 130-154.
98. Rosenkrantz, D.J., R.E. Stearns and P.M. Lewis. 1977. An Analysis of Several Heuristics for the Traveling Salesman Problem. *SIAM J. Comput.* 6: 563-581.
99. Russell, R. and W. Igo. 1979. An Assignment Routing Problem. *Networks*. 9: 1-17.
100. Schrage, L. 1981. Formulation and Structure of More Complex/Realistic Routing and Scheduling Problems. *Networks*. 11: 229-232.
101. Sexton, T.R. and L.D. Bodin. 1985. Optimizing Single Vehicle Many-to-Many Operations with Desired Delivery Times: Scheduling-Routing. *Transportation Sci.* 19: 378-435.
102. Sexton, T.R. and L.D. Bodin. 1980. The Single Vehicle Many-to-Many Routing and Scheduling Problem with Desired Delivery Times. Working Paper No. 80-014. University of Maryland at College Park.
103. Sherali, H.D. and M. Rios. 1984. An Air Force Crew Allocation and Scheduling Problem. *J. Opl Res. Soc.* 35: 91-103.
105. Solomon, M.M. 1986. On the Worst-Case Performance of Some Heuristics for the Vehicle Routing and Scheduling Problem with Time Window Constraints. *Networks*. 16: 161-174.
106. Spaccamela, A.M., A.H.G. Rinnooy Kan and L. Stougie. 1984. Hierarchical Vehicle Routing Problems. *Networks*. 14: 571-586.
107. Stein, D.M. 1978. Scheduling Dial-a-Ride Transportation Systems. *Transportation Sci.* 12: 233-249.

108. Stein, D.M. 1978. An Asymptotic, Probabilistic Analysis of a Routing Problem. *Mathematics of Operations Research*. 3: 89-101.
109. Stewart, Jr., W.R. 1985. An Improved Assignment Lower Bound for the Euclidean Traveling Salesman Problem. *Ops. Res. Letters*. 4: 55-60.
110. Svestka, J.A. 1976. Response to "A Note on 'The Formulation of the M-Salesman Traveling Salesman Problems' ". *Management Sci.* 22: 706.
111. Svestka, J.A. and V.E. Huckfeld. 1978. Computational Experience with an M-Salesman Traveling Salesman Algorithm. *Management Sci.* 19: 790-799.
112. Swersey, A.J. and W. Ballard. 1984. Scheduling School Buses. *Management Sci.* 30: 884-853.
113. Tillman, F.A. and T.M. Cain. 1972. An Upperbound Algorithm for the Single and Multiple Terminal Delivery Problem. *Management Sci.* 18: 664-683.
114. Vu, V.T. and W.C. Turner. 1975. Systems Design for Rural Refuse Collection. *AIIE Transactions*. 7:
115. Webb, M.H.J. 1972. Relative Performance of Some Sequential Methods of Planning Multiple Delivery Journeys. *Oper. Res. Quart.* 23: 361-372.
116. Wren, A. (Ed.) 1981. *Computer Scheduling of Public Transport: Urban Passenger Vehicle and Crew Scheduling*. North-Holland, Amsterdam.
117. Wren, A. and A. Holliday. 1972. Computer Scheduling of Vehicles from One or More Depots to a Number of Delivery Points. *Oper. Res. Quart.* 23: 333-344.
118. Yellow, P.C. 1970. A Computational Modification to the Savings Method of Vehicle Scheduling. *Oper. Res. Quart.* 21: 281-283.
119. Zipkin, P.H. 1982. Aggregation and Disaggregation in Convex Network Problems. *Networks*. 12: 101-117.