

소규모 물량을 가진 간선수송문제의 수송계획†

김우제¹ · 임성목² · 박순달²

¹대전대학교 산업시스템공학과 / ²서울대학교 산업공학과

Truck Scheduling for Linehaul Operations with Small Amount of Shipment

Woo-Je Kim¹ · Sung-Mook Lim² · Soon-Dal Park²

One of the most important problems encountered by parcel transportation firms or LTL (Less-than-truckload) firms is the planning of daily linehaul operations. The transportation firm's goal is to determine the most efficient way to move all freight from its originating terminal to its destination terminal after each shipment is picked up from the shipping dock. The purpose of this study is to design a transportation system and develop an efficient scheduling algorithm for linehaul operations carrying small amount of shipment.

This paper presents three approaches for efficient linehaul operations. The first approach examines drivers using the roundtrips which start from a terminal, visit several terminals, and return to the starting terminal. The second approach uses a freight assembly center where drivers take freight for a number of destination terminals which they then swap for freight for their starting terminal. The third approach is similar to the second approach in that it uses a transshipment point like a freight assembly terminal for shipment, but it has several transshipment points since each shipment may have a different transshipment point.

In this study, we developed a mathematical formulation and algorithm for each approach. The experimental results using data of a LTL firm show that the third approach is more efficient than the other two. Mileage and overnight stays of the third approach are reduced by 10% and 30%, respectively.

1. 서론

일반적으로 택배회사나 LTL(Less-than-truckload) 수송회사 등의 화물운수회사가 운영하고 있는 수송시스템에서 송하인에서부터 수하인까지 전달되어지는 과정은 집하→간선수송→배달과정을 거친다. 즉, 이들 화물운수회사에서는 간선수송이 이루어지기 전, 출발 화물터미널에서 고객의 선적량이 출하업자의 도크에서 취합되어 화물터미널로 모여지는 집하를 위한 수송이 이루어지며, 각 화물터미널간의 간선수송이 이루어진 다음에는, 이들 화물운수회사가 도착 화물터미널에서 수하인의 도착지점까지 배달이 이루어진다. 집하와 배달과 관련된 수송문제는 Pick-up and Delivery 문제로 정의되며 통상적으로

간선수송문제라고도 한다. 이 문제는 화물터미널에서부터 물건을 모두 싣고 고객에게 전달 또는 고객으로부터 수거하는 과정을 거친 후 화물터미널로 돌아온다. 즉, 화물터미널을 중심으로 하여 송하인과 수하인의 지점들을 순회방문하고 화물터미널로 돌아오는 전형적인 차량경로문제에 해당된다. 이에 반해 각 화물터미널간에 이루어지는 간선수송은 일종의 화물터미널간의 직송되는 경우를 의미한다.

일반적으로 이들 화물운수회사에서 간선수송의 운영에 드는 수송비가 총 수입의 약 30%를 담당하고 있다. 또한, 최근까지 조사된 대부분의 이들 화물운수회사들은 각 화물터미널사이에의 간선수송 운영계획을 수작업으로 처리하고 있었다. 또한, 지금까지의 대부분의 차량경로문제는 차량이 차고를 출발하여 귀환하는 것을 주요 문제로 삼았다. 이는 수송시스템

† 이 논문은 2000학년도 대전대학교 학술연구비지원에 의한 것임.

상 지선수송에 해당하는 수송계획으로 분류된다. 이러한 차량 경로문제를 대상으로 하는 연구는 폭넓게 연구되었다. Eilon *et al.* (1971), Geoffrion (1975), Magnanti (1981), Bodin *et al.* (1983), Laporte (1992), Mole (1979), 김갑환 외 2인 (1998) 등이 기존의 차량 경로문제에 대한 모형과 해법을 요약 정리하였다.

기존 연구가 물류센터를 출발하여 고객의 수요처를 순회 방문하고 돌아오는 차량 경로문제에 치우쳐서 연구된 것에 비하여 간선수송에 대한 수송계획 연구는 상대적으로 미진한 상태이다. 간선수송문제에 대한 연구는 간단한 모형인 수송계획법 (Transportation Problem), 중계수송모형 (Transshipment Problem) 등으로 현실적인 제한요소를 완화한 문제로 출발되었다. 그러나 현실적으로 화물운수회사에서는 운전기사의 편의와 차량의 유지보수, 그리고 운전기사의 호텔비 및 식사비 등의 비용적인 요인으로 간선수송의 경우에도 수송업무를 모두 마치고 출발하였던 화물터미널로 되돌아오도록 차량 스케줄을 작성하고자 한다. 또한 차량 스케줄을 작성할 때, 운전기사의 안전을 위하여 차량의 하루 최대운행거리가 제한적 요인으로 고려되어야 한다. 이러한 현실적인 제한요소가 고려된 간선수송문제에 대한 연구로는 미국에서 전국적인 수송 네트워크를 대상으로 하는 연구가 일부 있었다. Braklow *et al.* (1992)이 LTL 수송회사인 Yellow Freight System 회사의 간선수송을 위한 수송계획 프로그램인 SYSNET을 구축하였다. SYSNET은 수송물량에 따라 수송 네트워크를 설계하며 이에 따른 화물의 수송경로를 제공하여 준다. Yellow Freight System 회사가 미국 전역을 대상으로 하는 수송회사이므로 수송건수가 연간 1,500만 건에 이르며, 이 회사가 보유하고 있는 터미널의 수도 630여 개에 이를 정도로 대규모의 회사이므로, SYSNET은 대규모의 수송물량에 대한 수송계획을 처리하도록 구축되었다. Powell (1986)은 미국 전역을 대상으로 하는 LTL 수송회사의 수송 네트워크를 구축하는 수리 모형과 해법을 제시하였다. 이 연구 역시 300개의 화물터미널을 가진 회사를 대상으로 실시된 연구였다. Leung *et al.* (1990)은 지점 대 지점간의 수송문제를 순환경로로 해결하는 수리 모형과 해법을 제시하였다. 그러나 이러한 연구는 미국 전역을 대상으로 하는 연구로 물량이 상대적으로 많고 수송시간도 2~6일이 소요된다. 따라서 수송시스템의 설계방법도 2단계 또는 3단계의 연계수송이 이루어지는 수송계획을 수립하여야 하기 때문에 상대적으로 수송물량이 적고 수송지역이 넓지 않은 경우에는 적합하지 않다. 현재 우리나라에서의 화물운수회사의 수송환경은 하루 이내에 수송이 이루어질 정도로 수송지역이 협소하고, 수송물량도 아직은 상대적으로 적은 편이다. 따라서 수송지역이 일정한 제한된 지역이고 소규모 물량을 처리해야 하는 화물운수회사가 하루이내에 차량이 출발한 화물터미널로 귀환하는 조건을 가진 간선수송문제에 대한 연구는 아직 발표되어 있지 않다.

따라서 본 연구의 목적은 하루 이내에 수송하는 수송환경과 소규모 물량을 가진 택배회사나 LTL 수송회사에 대한 간선수송계획을 수립하는 효율적인 수송체계와 해법을 연구하는 것

이다. 이것을 위해 본 연구에서는 순환경로만을 이용하는 수송방법, 단일 화물집중센터를 이용하는 수송방법, 각 화물터미널간의 수송물량에 따라 서로 다른 중계지점을 갖는 수송방법 등의 세 가지 수송체제에 대해 각각의 해법을 개발하고 이들을 실험 비교한다.

2. 소규모 물량을 가진 간선수송문제

본 논문의 연구대상 문제에 대한 자세한 수송상황을 살펴보자. 대상문제는 여러 개의 화물터미널을 가지고 있으나, 이들 화물터미널들은 제한된 범위 안에 있어 일일수송이 가능한 지역 내에 분포한다. 다음으로 이들 터미널간에 하루 이내에 수송하여야 할 수송물량이 차량단위로 주어진다. 예를 들면 터미널 1에서 터미널 2까지의 물량은 0.6대분과 같은 형식으로 주어진다. 그러나 이 수송물량은 상대적으로 작은 소규모 물량 이므로, 각 화물터미널간의 수송물량 중 최대 물량은 1대분으로 가정한다. 이 가정은 중소규모의 택배회사나 LTL 회사에서 이러한 소규모물량을 가지고 있으므로, 중소규모의 화물운수 회사에 현실적인 가정이다. 다음으로 간선수송에 사용되는 차량은 일반적으로 대형트럭이 사용되므로 동일한 규모의 차량으로 운영된다고 가정하며, 각 화물터미널에서는 당일에 출발할 수 있는 차량의 수가 제한되어 있다. 그리고 화물운수회사에서는 운전기사가 자신의 차고로 귀환하지 못하고 타 지역의 화물터미널에서 하룻밤을 보내게 되면 운전기사의 숙식에 관련된 호텔비, 식사비, 업무의 수당 등을 지급하여야 하고, 차량의 유지보수와 운전자의 만족도 증대 등의 이유로 간선수송을 위한 차량 스케줄을 작성할 때 가능한 한 많은 차량이 출발한 터미널로 귀환하는 것을 요구사항으로 규정하고 있다. 또한, 각 화물터미널간의 간선수송은 야간수송을 원칙으로 하므로 한 차량이 하루에 운행할 수 있는 거리에 제한이 있다. 그런데 하나의 차량이 출발터미널을 출발하여 여러 개의 화물터미널을 방문하면서 각 터미널간의 수송물량을 수송하는 경우에는 각 화물터미널을 방문할 때마다 상하역 시간이 발생하고, 터미널을 방문하기 위해 고속도로 운행이 아닌 시내 운행을 하게 되므로 상대적으로 이 차량이 하루에 운행할 수 있는 거리는 더욱 제한적이게 된다. 따라서 각 차량에 대한 차량 스케줄을 작성할 때 한 차량의 화물터미널 방문횟수에 따라 하루에 운행하게 할 수 있는 운행거리를 줄여 주어야 한다. 화물수송의 기본단위는 차량단위이며, 이들은 모두 파레트 단위로 포장되어 있으며 파레트 단위로 차량에 혼적이 가능하다. 즉, 예를 들면 터미널 1을 출발하여 터미널 2와 3을 순차적으로 방문하는 경우에는 터미널 1에서는 터미널 1에서 터미널 2로 가는 물량과 터미널 1에서 터미널 3으로 가는 물량을 혼적하여 동시에 상차 가능하다. 이 간선수송문제에서 주어지는 정보는 각 화물터미널간의 운행거리, 각 화물터미널간에 하루에 수송해야 할 수송물량이 차량단위로 주어진다. 그리고 한 차량의 하

표 1. 소규모 물량을 가진 간선수송문제

터미널 수: 다수(일정 지역내에 분포)
차량종류: 동일
터미널내의 차량 수: 제한적임
수송계획단위: 하루
수송물량: 소물량(각 터미널간의 최대물량: 1대분)
화물혼적: 가능
주어지는 자료: 터미널간의 거리행렬, 터미널간의 수송해야 될 물량(차량단위)
제한요소: 한 차량의 운행거리 제한, 차량의 터미널 방문시 상하역시간 추가
목적: 총 운행거리의 최소화(우선적임), 비귀환 차량수의 최소화

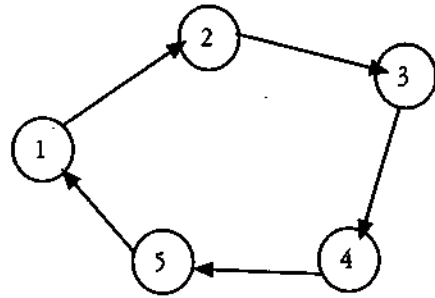


그림 1. 순환경로.

이러한 순환경로에 의한 수송계획을 수리계획법으로 모형화하면 다음과 같다.

변수 및 상수:

S_i = 터미널 i 에서 출발하고 운행거리 제약을 만족하는

모든 가능한 순환경로의 집합

$$S = \bigcup S_i$$

y_R = 순환경로 R 을 따라 운행하는 차량의 수

d_R = 순환경로 R 의 운행거리

x_{ij} = 터미널 i 에서 터미널 j 로 수송되는 화물수송량

N_i = 터미널 i 에서의 출발가능한 차량의 수

D_{mn} = 터미널 m 에서 터미널 n 으로 수송되어야 할 물량 (차량단위)

$$T_j = \begin{cases} D_{mn} & \text{if } n=j \\ -D_{mn} & \text{if } m=j \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$\alpha_{ij}^R = 1$, 만약 터미널 i 에서 터미널 j 의 구간이 순환경로 R 에 속할 경우
 $= 0$, 그렇지 않은 경우

루 최대가능운행거리, 화물터미널에서의 상하차 고려 시간을 운행거리로 환산한 값 등이 기본 정보로 주어진다.

이러한 문제 상황에서 목적함수는 총 운행거리를 최소화하는 것과 출발한 화물터미널로 귀환하지 못하는 차량의 수를 최소화하는 것을 목적으로 한다. 실제 화물운수회사의 운영에서는 총 운행거리를 최소화하는 것을 1차 목표로 하고 부수적으로 비귀환 차량의 수를 줄이는 것을 2차 목표로 하고 있다.

따라서 본 논문에서의 목표는 위와 같은 상황에서 각 화물터미널간의 수송물량을 모두 처리할 수 있고, 총 운행거리를 우선적으로 최소화하고 출발한 화물터미널로 귀환하지 못하는 차량의 수를 최소화하는 차량경로계획을 수립하는 것이다.

본 논문에서 대상으로 하는 소규모 물량을 가진 간선수송문제를 요약하여 정의하면 <표 1>과 같다.

3. 순환경로를 이용한 수송계획

간선수송문제를 해결하기 위한 방법으로 먼저 순환경로에 의해서 수송계획을 수립하는 방법에 대한 수송체제와 해법을 살펴보자. 순환경로에 의한 방법은 하나의 화물터미널을 출발하여 여러 화물터미널을 방문하고 출발한 터미널로 되돌아오는 차량경로에 의해 수송물량을 수송하는 경우이다. 예를 들면 <그림 1>과 같은 순환경로에서는 다음과 같이 화물을 수송할 수 있다. 터미널 1에서 터미널 2로 가는 물량을 조사해서 차량에 선적한다. 차량의 여유가 있으면 터미널 1에서 터미널 3으로 가는 물량을 혼적한다. 계속해서 같은 방법으로 터미널 3, 터미널 4, 터미널 5로 가는 물량을 조사하여 차량에 혼적한다. 터미널 2에서는 터미널 1에서 터미널 2까지 수송된 물량을 하차시킨 후, 차량의 여유공간에 대해 터미널 2에서 터미널 3, 터미널 4, 터미널 5, 터미널 1로 가는 화물들을 차량의 여유공간을 조사하여 선적한다. 터미널 3, 터미널 4, 터미널 5에서도 터미널 2에서와 같이 자신의 터미널이 최종 도착지인 화물을 하역하고 다음 방문지로 갈 물량들을 선적하여 수송하게 된다.

$$\begin{aligned} &\text{Minimize} && \sum_{R \in S} d_R y_R \\ &\text{s.t.} && \sum_{R \in S_i} y_R \leq N_i \quad \forall i \\ &&& x_{ij} \leq \sum_{R \in S} \alpha_{ij}^R y_R \quad \forall i, j \\ &&& \sum_i x_{ij} - \sum_j x_{ji} = T_j \quad \forall j \\ &&& y_R \geq 0 \text{ 인 정수, } x_{ij} \geq 0 \end{aligned}$$

첫 번째 제약식은 각 터미널 i 에서 출발한 차량의 수는 각 터미널에서 보유한 차량수를 넘지 않는 가는 조건이며, 두 번째 제약식은 순환경로와 경로내에서 흐르는 화물수송량의 관계로 순환경로내에 터미널 i 에서 터미널 j 의 구간이 존재하지 않으면 화물수송이 이루어지지 않도록 제한한다. 세 번째 제약식은 화물수송량의 흐름 보존에 관련된 식이다. 그리고 목적함수는 총 운행거리를 최소화한다. 각 차량의 운행거리에 대한 제약은 가능한 순환경로 집합 S_i 를 생성할 때 고려된다.

그런데 위의 식은 Set Partitioning 문제에 제약식이 추가된 형태이다. 그런데 이 문제에서의 가능 순환경로는 무수히 많으므로 이 문제를 열제조기법(Column Generation)과 같은 수리해법에 의하여 최적해를 구하기 힘이 든다.

따라서 본 논문에서는 다음과 같은 Greedy 해법 형태의 휴리스틱 해법을 개발하였다.

초기화: $num_arc = 6$

단계 1: 방문하는 터미널의 수가 num_arc 인 순환경로들 중에서 시작지점에서의 차량 여유분이 존재하고, 운행거리가 최대운행가능거리를 넘지 않는 경로들을 선정하여 큐 RoundTripQueue에 삽입한다.

단계 2: 큐 RoundTripQueue가 비어 있으면 단계 5로 가고, 아니면 단계 3으로 간다.

단계 3: 큐 RoundTripQueue에 있는 모든 순환경로들에 대해 현재의 터미널간 수송량 행렬을 이용하여 구간별 화물선적량을 계산한 후, 구간별 평균 적재량이 기준치 이하인 경로들은 큐 RoundTripQueue에서 제거한다.

단계 4: 큐 RoundTripQueue에 있는 경로들 중에서 Merit Function의 값이 가장 우수한 경로를 택하여 큐 RoundTripQueue에서 제거하고, 수송 스케줄에 삽입한다. 이 경로에 의해 수송되는 화물수송량을 터미널간 수송량 행렬에서 차감하여 터미널간 수송량 행렬을 수정한다. 그리고 단계 2로 간다. 단, Merit function의 값은 다음과 같이 계산된다.

$$Merit\ function = (총적재량) \times \alpha + (출발지점에서의 차량 여유분) \times \beta + (운행거리) \times \gamma$$

단계 5: $num_arc := num_arc - 1$;

만일 num_arc 가 1이면 종료하고, 아니면 단계 1로 간다.

즉, 6개의 터미널을 방문하는 순환경로에서 차량운행거리 제한조건을 만족하고, 출발 가능 차량이 있고, 평균 적재량이 일정 수준 이상인 순환경로 중 Merit Function의 값을 계산하여 가장 높은 것을 수송 스케줄로 선정하고 이에 따라 수송되는 물량을 수송량 행렬에서 차감한다. 이 과정을 차량운행거리 제한조건을 만족하고, 출발 가능 차량이 있고, 평균 적재량이 일정 수준 이상인 순환경로들에 대해 반복하고 더 이상 만족하는 순환경로가 없는 경우에는 5개의 터미널을 방문하는 순환경로, 4개의 터미널을 방문하는 순환경로, 3개의 터미널을 방문하는 순환경로, 2개의 터미널을 방문하는 순환경로에 대해 순차적으로 조사한다.

위의 과정을 일차적으로 일정 수준의 평균 적재량을 갖는 순환경로들에 조사한 후, 다음으로 이 기준치를 낮춘 후 위의 과정을 반복하면 평균 적재량이 우수한 순환경로들부터 선택하면서 모든 화물수송량을 수송할 수 있는 순환경로들을 구할

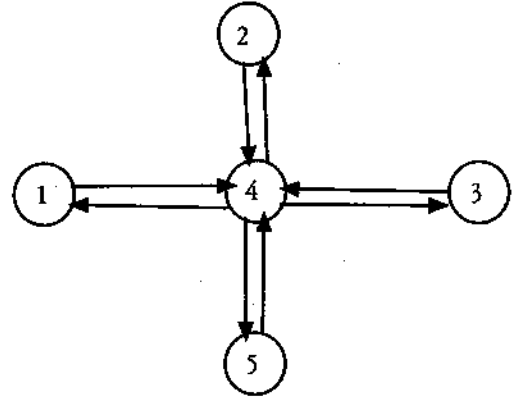


그림 2. 단일 화물집중센터.

수 있게 된다.

4. 단일 화물집중센터를 이용한 수송계획

단일 화물집중센터를 이용하는 수송계획은 Fedex사의 Hub and Spoke 시스템과 같이 각 터미널에서 모든 화물을 단일 화물집중센터로 수송한 후 이를 재분류하여 다시 최종 목적지까지 수송하는 수송체계이다. <그림 2>는 터미널 4를 화물집중센터로 이용하는 경우의 예이다. 즉, 터미널 1, 터미널 2, 터미널 3, 터미널 5에서는 모든 수송해야 될 화물들을 터미널 4로 보낸 후, 터미널 4에서 이들을 재분류하여 다시 각 터미널로 재수송하는 방법이다.

이러한 경우의 수송은 수송물량이 한 대분이 안되는 물량에 대해 차량의 적재효율을 높이면서 허브를 왕복으로 운행하므로 효율적이게 된다. 그리고 화물량이 각 터미널에서 보내는 양과 받는 양이 균형을 이루면 모든 차량이 출발한 터미널로 귀환할 수 있게 된다. 그러나 보내는 양과 받는 양이 심한 차이를 보이게 되는 비귀환 차량수가 증대되는 단점이 있다.

이러한 단일 화물집중센터를 이용한 수송계획을 수리계획 방법으로 모형화하면 다음과 같다.

변수 및 상수:

$y_k = 1$, 만일 터미널 k 가 화물집중센터로 사용되면
 $= 0$, 그렇지 않으면

D_{ij} = 터미널 i 에서 터미널 j 로 수송되어야 할 물량(차량단위)

d_{ij} = 터미널 i 에서 터미널 j 까지의 거리

M_d = 한 차량의 하루 최대운행가능거리

A = 터미널 i 와 터미널 j 간의 수송해야할 물량이 있는 구간의 집합

N_i = 터미널 i 에서의 출발가능한 차량의 수

$$\text{Minimize } \sum_i \sum_k (\sum_j D_{ij}) d_{ik} y_k + (\sum_j D_{ji}) d_{ji} y_k$$

$$\begin{aligned} \text{Minimize } & \sum_k (|\sum_{i \neq k} \{ \sum_j D_{ij} \} - \sum_{j \neq k} \{ \sum_i D_{ji} \}|) y_k \\ & + \sum_j (|\sum_i D_{ij} - \sum_j D_{ji}|) + (1 - y_j) \\ \text{s. t. } & \sum_j y_j = 1 \\ & \sum_k (d_{ik} + d_{kj}) y_k \leq M_d \quad \forall (i, j) \in A \\ & \sum_k (d_{ik} + d_{ki}) y_k \leq M_d \quad \forall i \\ & |\sum_j D_{ij}| (1 - y_j) \leq N_i \quad \forall i \\ & \sum_k (|\sum_{i \neq k} \{ \sum_j D_{ij} \} - \sum_{j \neq k} \{ \sum_i D_{ji} \}|) y_k \leq \sum_k N_k y_k \\ & y_k \in \{0, 1\} \end{aligned}$$

(단, $a^+ = a, a \geq 0$ 인 경우)
 $0, a < 0$ 인 경우)

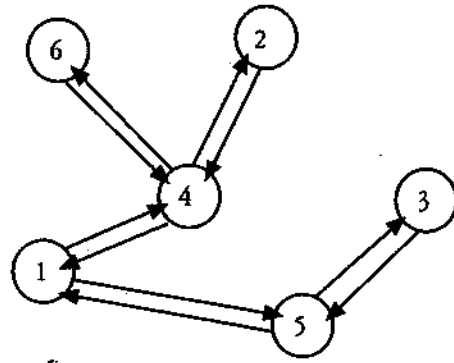


그림 3. 각 터미널간 수송화물에 따른 중계지점.

첫 번째 제약식은 화물집중센터가 하나가 되도록 하며, 두 번째 제약식은 수송화물이 제한된 시간내에 최종 터미널에도 착할 수 있도록 화물의 움직이는 거리가 차량의 최대운행가능거리 보다 짧게 되도록 제약한다. 세 번째 제약식은 한 차량의 운행거리가 최대운행가능거리내에서 이루어지도록 제한한다. 네 번째 제약식은 화물집중센터가 아닌 각 터미널에서의 출발 차량수가 각 터미널에서의 출발 가능 차량수보다 작아야 한다는 조건이며, 다섯 번째 제약식은 화물집중센터에서 새로이 출발하게 되는 차량의 수가 이 터미널이 보유하고 있는 차량의 수보다 작아야 한다는 조건이다. 그리고 첫 번째 목적함수는 총 운행거리를 최소화하려는 목적함수이고, 두 번째 목적함수는 비귀환 차량의 수를 최소화하는 식이다.

이 문제에 대한 해법은 올림부호를 포함하고 있으므로 정수 계획법으로 한번에 풀 수 없다. 그런데 현실문제에서 화물집중센터로 고려될 수 있는 화물터미널의 수는 제한적이므로 열거법(Enumeration)으로도 쉽게 해를 구할 수 있다.

5. 각 터미널간의 수송물량에 따른 중계지점을 이용한 수송계획

각 터미널간의 수송물량에 따라 중계지점을 달리하는 방법이다. 두 번째 방법인 단일 화물집중센터를 이용하는 방법은 모든 터미널이 화물집중센터로 화물을 보내는 데 반하여 이 방법은 각 터미널간의 수송물량에 따라 중계지점이 달라진다. 따라서 여러 개의 터미널이 중계지점으로 이용될 수 있다. 즉, 예를 들면 <그림 3>과 같이 터미널 1과 터미널 2간의 수송물량은 터미널 4를 중계지점으로 하여 수송하며, 터미널 1과 터미널 6간의 수송물량도 터미널 4를 중계지점으로 이용한다. 그러나 터미널 1과 터미널 3간의 수송물량은 터미널 5를 중계지점으로 한다. 그러면 터미널 1에서는 터미널 4로 터미널 2, 터미널 4, 터미널 6으로 가는 물량을 한차에 혼적하여 차량 적재율을 높이면서 수송할 수 있다. 따라서 각 터미널 간에 수송물량에 따라 화물집중지점을 동적으로 변경하는 시스템이라고

도 할 수 있다.

따라서 이 수송시스템의 장점은 각 터미널 간의 수송물량에 따라 화물중계지점이 동적으로 할당되기 때문에 차량의 만차 효과를 더욱 증대시킬 수 있다. 그러나 화물중계지점이 여러 개 운영하여야 하므로 박스단위의 수송에서는 화물의 분류장비등이 중복적으로 투자될 수 있다. 그러나 LTL 화물회사에서와 같이 화물의 기본단위가 파레트인 경우에는 분류장비에 대한 투자 부담이 상대적으로 적어 이 수송시스템을 적용하기가 쉽다.

이러한 각 터미널간 수송화물에 따라 화물중계지점을 달리하는 방법을 이용한 수송계획을 수리계획법으로 모형화하면 다음과 같다.

변수 및 상수:

- $x_{ij}^k = 1$, 만일 터미널 i 에서 터미널 j 간의 수송물량을 중계지점 k 를 이용하여 수송할 때
- $= 0$, 그렇지 않으면
- D_{ij} = 터미널 i 에서 터미널 j 로 수송되어야 할 물량(차량 단위)
- d_{ij} = 터미널 i 에서 터미널 j 까지의 거리
- M_d = 한 차량의 하루 최대운행가능거리
- A = 터미널 i 와 터미널 j 간의 수송해야 할 물량이 있는 구간의 집합
- N_i = 터미널 i 에서의 출발가능한 차량의 수

$$\begin{aligned} \text{Minimize } & \sum_i \sum_k (|\sum_j D_{ij} x_{ij}^k| d_{ik}) + \sum_j \sum_k (|\sum_i D_{ji} x_{ij}^k| d_{kj}) \\ \text{Minimize } & \sum_k \sum_j (|\sum_j D_{ij} x_{ij}^k| - |\sum_i D_{ji} x_{ij}^k|)^+ \\ \text{s. t. } & \sum_k x_{ij}^k = 1 \quad \forall i, j \\ & (d_{ik} + d_{kj}) x_{ij}^k \leq M_d \quad \forall i, j, k \\ & (d_{ik} + d_{ki}) x_{ij}^k \leq M_d \quad \forall i, j, k \\ & |\sum_k \sum_j D_{ij} x_{ij}^k| \leq N_i \quad \forall i \\ & x_{ij}^k \in \{0, 1\} \end{aligned}$$

(단, $a^+ = a, a \geq 0$ 인 경우)
 $0, a < 0$ 인 경우)

첫 번째 제약식은 각 터미널간의 수송화물에 따라 중계지점을 선정하는 식이다. 두 번째 제약식은 수송화물이 제한된 시간내에 최종 터미널에 도착할 수 있도록 화물의 움직이는 거리가 차량의 최대운행가능거리보다 짧게 되도록 제약한다. 세 번째 제약식은 한 차량의 운행거리가 최대운행가능거리내에서 이루어지도록 제한한다. 네 번째 제약식은 각 터미널에서의 출발 차량수가 각 터미널에서의 출발 가능 차량수보다 작아야 한다는 조건이다. 그리고 첫 번째 목적함수는 총 운행거리를 최소화하려는 목적함수이고, 두 번째 목적함수는 비귀환 차량의 수를 최소화하는 식이다.

이 문제 역시 단일 화물집중센터를 이용한 방법과 마찬가지로 올림부호를 가지고 있으므로 정수계획법으로 풀 수 없다. 그런데 유전 알고리즘(Genetic Algorithm)은 비선형계획법 문제에 잘 적용될 수 있다. 또한, 이 문제에서는 각 터미널 쌍이 어떠한 중계지점을 이용하는지, 중계지점의 개수가 몇 개인지 등의 다양하고 복잡한 결정사항들이 하나의 유전자로 간단히 표현될 수 있고, 적합한 해의 특성을 효과적으로 나타낼 수 있다. 따라서 각 터미널간 수송화물에 따라 화물중계지점을 달리하는 방법을 이용한 수송계획문제에 대한 해법으로 본 논문에서는 유전 알고리즘을 제안하였다.

유전 알고리즘에서는 개체표현이 문제의 특성을 잘 반영할 수 있도록 설계되어야 하는데 여기서는 터미널 쌍(Pair)의 개수만큼의 인자(Gene)를 가진 개체에 의해 해를 표현한다. 즉, 하나의 개체에서의 각 인자는 각 터미널 쌍의 중계지점을 나타낸다. 이것에 의해 변수 x_{ij} 를 손쉽게 표현할 수 있다. 초기모집단 구성 방법은 임의의 개체를 생성하여 구성하는데 먼저 하나의 개체에서 사용될 중계지점의 개수를 선정하고 각 터미널간의 중계지점을 그 개수 안에서 생성하도록 한다. 초기모집단의 수는 실험결과 100개로 제한하는 것이 가장 좋은 것으로 나타났다.

선별방법으로는 비례적 재생산(Proportionate Reproduction), 토너먼트 선별(Tournament Selection), 순위 선별(Ranking Selection) 등의 방법이 있는데(Goldberg, 1989), 여기서는 모집단 중 적합도 함수값이 가장 우수한 개체를 선택하는 순위 선별 방법을 사용한다. 이렇게 선별된 개체들은 다음 세대의 개체를 구성하는데 사용된다. 이는 가장 좋은 개체가 유전연산을 통해 손실되는 것을 방지하기 위하여 현재까지 생성된 개체 중에서 가장 좋은 개체를 모집단에 보존시키는 우수개체 보존전략이다. 이 우수개체 보존전략은 상위 5%의 우수개체를 보존시키는 것이 실험결과 우수한 것으로 나타났다. 다음으로 유전연산자로 활용되는 교차와 돌연변이과정은 다음과 같이 구성하였다. 교차는 서로 다른 두 개체의 유전인자들이 결합하여 자손을 생성하는 과정인데, 본 연구에서는 일점교차를 통하여 얻어지는 두 개의 개체에 대해 토너먼트 선별을 하여 하나의 개체만을 다음 세대의 개체로 받아들였다. 이 방법이 단순한 이점교차와 일점교차에 비하여 우수한 개체만을 선별해 주므로 더 우수한 것으로 실험결과 나타났다. 실험결과 교차

율은 90%로 설정하였다. 돌연변이는 개체에 몇 개의 인자를 임의로 변화시키는 연산인데, 여기서는 개체내의 임의의 인자를 선정한 후 이를 새로운 중계지점으로 변경하였다. 본 연구에서는 수 차례의 실험결과를 통하여 모집단의 5%의 개체에 대해 돌연변이를 발생시켰다.

다음으로 각 개체의 적응도를 평가하는 함수로 사용된 적합도 함수는 수리계획법의 목적함수와 제약식을 혼합하여 다음과 같이 설정하였다.

$$\text{적합도 함수} = \text{운행 총거리} \times \alpha + \text{차량과 화물에 대한 최대운행거리에 대한 위반정도} \times \beta + \text{비귀환경로의 수} \times \gamma + \text{각 터미널별 출발가능차량을 초과한 차량수} \times \delta$$

세대수는 실험결과에서 세대수를 1,000세대에서 1,500세대 정도 수행하면 해가 수렴하는 것으로 나타나 1,500세대로 정하였다.

6. 실험결과

본 연구에서 제시한 세 가지 수송시스템에 대한 효율 분석을 실시하기 위해 각 해법을 구현하였는데, 순환경로를 이용한 방법과 각 터미널별 중계지점을 이용한 방법에 대해 Visual C++로 프로그램을 작성하였다. 그리고, 단일 화물집중센터를 이용한 방법은 단순열거법을 사용하여 직접 계산하였다. 세 가지 방법에 대한 비교 실험은 Pentium CPU 550MHz, 64M RAM를 가진 IBM-PC에서 수행하였다.

세 가지 수송시스템에 대한 비교적도로는 총 운행거리, 비귀환 차량수, 총 차량경로의 수를 사용하였다. 실험 자료로는 15개의 터미널을 보유하고 있는 LTL 화물운수회사의 5일간 데이터를 이용하였으며, 실험 결과는 <표 2>와 같다.

첫 번째 방법인 순환경로에 의한 수송계획은 비귀환 차량경로가 발생하지 않도록 하는 장점이 있는 반면, 차량의 총 운행거리가 크게 증가되는 단점이 발견되었다. 두 번째 방법인 단일 화물집중센터를 이용한 수송방법의 경우에는 순환경로를 이용한 수송방법에 비해 총 운행거리를 50~60% 정도로 크게 줄일 수 있었고, 총 차량 경로수도 50~60% 정도 줄일 수 있었지만, 비귀환 차량이 발생하였다. 세 번째 방법인 각 터미널별 중계지점을 이용한 방법은 총 운행거리와 총 차량경로의 수 면에서 다른 두 가지 방법에 비해 우수한 것으로 나타났다. 총 운행거리의 경우에는 단일 화물집중센터를 이용하는 방법에 비해 15~40% 정도 향상되었으며, 총 차량 경로수도 단일 화물집중센터를 이용하는 방법에 비해 10~35% 정도 줄었다. 반면, 비귀환 차량의 수는 단일 화물집중센터를 이용하는 방법에 비해 40~50% 정도 증가하였다. 그러나 화물운수회사에서 운영가능한 범위의 해를 제공하였다.

표 2. 실험결과

(단위: 총 운행거리(Mile), 비귀환 차량수(대), 총 차량 경로수(개))

	순환경로를 이용한 수송계획			단일 화물집중센터를 이용한 수송계획			각 터미널간의 수송물량에 따른 중계지점을 이용한 수송계획		
	총 운행거리	비귀환 차량수	총 차량 경로수	총 운행거리	비귀환 차량수	총 차량 경로수	총 운행거리	비귀환 차량수	총 차량 경로수
1일째	33024	0	68	10930	5	35	10181	8	31
2일째	37394	0	78	18785	7	55	12482	12	43
3일째	35822	0	75	17787	8	57	12546	10	42
4일째	38533	0	80	17322	8	54	11952	11	41
5일째	36372	0	75	17036	5	52	10315	9	38

본 실험의 결과로 소규모물량에 대해서는 순환경로만을 이용하는 것보다 화물의 혼적에 의한 차량의 적재율을 향상시킬 수 있는 중계지점을 이용한 방법이 우수한 것을 알 수 있었다. 또한 각 터미널별 중계지점을 이용한 방법에 의해 제공되는 해는 화물운수회사에서 수작업으로 하고 있는 방법보다 총 운행거리 면에서 10% 정도 개선되었으며, 비귀환 차량의 수에서는 약 30% 정도 향상되었다.

수, 총 차량 경로의 수 등을 사용하였다. 실험의 결과로서 각 터미널간의 수송물량에 따라 다수 개의 중계지점을 유지하는 수송방법이 총 운행거리와 총 차량 경로수 측면에서 가장 우수한 것으로 나타났으며, 비귀환 차량의 수도 화물운수회사에서 운영가능한 범위의 해를 제공하였다. 또한 이 해법을 적용한 결과 현재 회사에서 하고 있는 방법에 비하여 총 운행거리를 10%, 비귀환 차량의 수를 30% 가량 줄일 수 있었다.

7. 결론

본 논문에서는 택배회사나 LTL 수송회사와 같은 화물운수회사가 소규모 물량을 가진 경우의 수송계획을 효율적으로 처리하기 위해서 세 가지 수송시스템을 설계하고 비교하였다. 본 연구에서 개발한 세 가지 방법은 여러 터미널을 순회방문한 후 출발지로 돌아오는 순환경로에 의한 수송계획, 하나의 화물집중 센터를 이용하여 모든 수송물량을 처리하는 방법, 각 터미널간의 수송물량에 따라 다수 개의 중계지점을 유지하는 방법 등이다. 화물집중지점 또는 중계지점을 두는 방법들은 소규모 물량의 경우 여러 물량을 모아서 수송하는 것이 만차율을 높일 수 있다는 것에 근거한다.

본 연구에서는 세 가지 수송방법에 대한 수리 모형을 수립하고, 각각의 해법들을 제시하였다. 우선 순환경로에 의한 수송계획을 처리하기 위한 Greedy 해법 형태의 휴리스틱 기법을 개발하였고, 다수 개의 중간 화물집중지점을 유지하는 수송계획을 수립하기 위한 유전자 알고리즘을 설계하였다. 하나의 화물집중센터를 이용하여 모든 물량을 처리하는 수송계획의 경우에는 단순 열거법을 사용하여 처리하였다.

각 해법의 성능을 비교하기 위해서 한 수송회사의 실제 데이터를 이용한 실험을 수행하였다. 세 가지 해법의 성능을 비교하기 위한 척도로서는 차량의 총 운행거리, 비귀환 차량의

참고문헌

김갑환, 고창성, 신재영 (1998), 화물 수송계획 및 운영의 정량적 모형에 대한 조사 연구, *산업공학* 11(1), 1-14.

Braklow, J., Graham, W., Hassler, S., Peck, K. and Powell, W.(1992), Interactive optimization service and performance for yellow freight system, *Interfaces*, 22(1), 147-172.

Bodin, L., Golden, B., Assad, A. and Ball, M.(1983), Routing and scheduling of vehicles and crews : The state of the art, *Computer and Operations Research*, 10, 69-211.

Eilon, S., Watson-Gandy C. D. T and Christofides N.(1971), *Distribution Management*, Hafner Publishing Co. New York.

Geoffrion, A. (1975), A guide to computer-assisted methods for distribution systems planning, *Sloan Management Review*, Winter.

Goldberg, D.(1989), *Genetic Algorithms in search, optimization and machine learning*, Addison-Wesley, New York.

Laporte, G.(1992), The vehicle routing problem : An overview of exact and approximate algorithms, *European J. of Operational Research*, 59, 345-358.

Leung, J., Magnanti, T., and Singhal, V.(1990), Routing in point-to-point delivery systems: Formulations and solution heuristics, *Transportation Science*, 24(4), 245-260.

Magnanti, T.(1981), Combinatorial optimization and vehicle fleet planning: Perspectives and prospects, *Networks*, 11, 179-214.

Mole, R. H.(1979), A survey of local delivery vehicle routing methodology, *J. of Operational Research Society*, 30, 245-252.

Powell, W.(1986), A local improvement heuristic for the design of less-than-truckload motor carrier networks, *Transportation Science*, 20(4), 246-257.

김우제

서울대학교 산업공학과 학사

서울대학교 산업공학과 석사

서울대학교 산업공학과 박사

현재: 대전대학교 산업시스템공학과 부교수

관심분야: 물류관리, 컴퓨터응용 OR

박순달

조선대학교 수학과 학사

University of Cincinnati 박사

현재: 서울대학교 산업공학과 교수

관심분야: Deterministic OR, 컴퓨터 활용

임성목

서울대학교 산업공학과 학사

서울대학교 산업공학과 석사

현재: 서울대학교 산업공학과 박사과정

관심분야: 컴퓨터 활용, 선형계획법,

조합최적화