

입출차 택배 차량의 허브 터미널 할당문제*

고창성** · 정기호***†

경성대학교 산업경영공학과 교수, *경성대학교 경영학과 교수

Hub Terminal Assignment Problem of Incoming and Outgoing Courier Vehicles

Chang Seong Ko** · Ki Ho Chung***

**Department of Industrial Management Engineering, Kyung Sung University

***Department of Business Administration, Kyung Sung University

Due to the increasing demand for parcel delivery, the amount of parcel delivery that couriers have to handle exceeds the current terminal capacity. To solve this problem, a new terminal will be built in addition to the existing terminal, or the terminal will be jointly used through alliances with competing courier companies. In this case, a hub terminal that can be used by courier companies is physically composed of several terminals. At this time, when a vehicle departing from a sub terminal arrives at the hub terminal, the decision to which terminal in the hub to allocate becomes a very important issue for parcel delivery companies for efficient terminal operation. In a situation where the capacity that can be handled per day in the hub terminal is limited, minimizing the travel distance of vehicles between terminals in the hub plays a decisive role in increasing the efficiency of hub terminal operation. This study presented a mathematical model for determining which terminal in the hub should be allocated to vehicles arriving at the hub from each sub terminal, and from which terminal the vehicle going to the destination sub terminal should be released. A solution method using Excel is presented and in order to find out the possibility of practical application, 12 example problems are solved, and the results are analyzed and presented.

Keyword : Courier industry, hub terminal, sub-terminal, vehicle assignment

* This work was supported by the Ministry of Education of the Republic of Korea and the National Research Foundation of Korea (NRF-2020S1A5A2A01046318).

† **Corresponding Author** : Department of Business Administration, Kyung Sung University, 309 Suyeong-ro, Nam-gu, Busan 48434, Korea.

Tel: +82-51-663-4451, E-mail: khchung@ks.ac.kr

Received: 9 May 2021, **Revised**: 18 June 2021, **Accepted**: 29 July 2021

1. 서론

점점 늘어나는 택배수요 증가로 국내 택배기업들이 처리해야 하는 택배수송 물량이 기존에 사용하고 있던 허브 터미널의 용량을 초과하는 문제에 직면해 있다. 이를 해결하기 위해 기존의 허브 터미널 외에 추가로 터미널을 새로 신축하거나 아니면, 다른 택배기업들과 제휴를 맺고 타 기업의 허브 터미널을 공동 이용하기도 한다. 이러한 경우 택배기업이 사용하게 되는 허브 터미널이 물리적으로 여러 개의 터미널들로 구성되게 된다. 이때, 지역 거점 터미널인 서브터미널에서 출발한 트럭이 허브 터미널에 도착했을 때, 허브 내 어느 터미널에 할당할 것인가에 대한 결정은 터미널 운영의 효율화를 위해 택배기업들에게는 대단히 중요한 이슈가 된다. 왜냐하면 택배기업 경쟁력의 기본이 비용 절감인데, 비용의 원천은 바로 집하(Consolidation)에 의해 좌우되기 때문이다. 즉, 집하된 물량이 많을수록 배송지가 동일한 물량 또한 비례적으로 증가하게 되는데, 이는 그 배송지로 수송할 차량의 적재율을 높여 수송 효율화를 향상시킬 수 있음을 의미한다. 이는 마치 공급사슬관리 측면에서 많이 활용하는 크로스도크 기능을 허브 터미널에서 수행하는 것과 같다. 즉, 택배시스템에서 포인트-투-포인트(point to point) 방식보다 훨씬 효율적인 허브 앤 스포크(hub and spoke) 방식이 많이 사용되고 있기 때문에, 크로스 도크 전략을 활용함으로써 물류비를 낮추고 집하와 출하를 신속하게 처리할 수 있다. 허브 앤 스포크 방식은 고객들로부터 의뢰받은 택배물량을 지역별 거점 터미널인 서브터미널에 모두 집하한 뒤, 중앙의 거점 터미널인 허브 터미널로 보내지고, 여기서 목적지별로 분류하여 각각의 목적지 서브터미널로 배송되는 방식이다. 그런데 택배수요의 급격한 증가로 인해 택배기업들이 처리해야 할 택배수송물량이 기존의 허브 터미널 용량을 초과하게 되어 국내 주요 택배기업들은 제 2, 제 3의 허브 터미널을 신축하여 운영하고 있다.

허브 터미널과 서브터미널 운영 체계는 택배기업들마다 조금씩 차이가 있으나, 일반적인 택배서비스 네트워크의 운영 상황을 살펴보면 다음과 같이 정리할 수 있다. 허브 터미널은 예를 들어, 대전, 옥천, 칠곡과 같이 대체로 지리적으로 중앙에 위치하고 있고, 지역 거점 터미널인 서브터미널은 각 지역별로 위치하고 있는데, 서브터미널에서 집하된 물량은 저녁 6시~10시 사이에 간선수송에 의해 허브 터미널로 보내어진다. 허브 터미널에 입고된 물량들은 자정 전후로 하차-목적지별 분류-상차 과정을 거쳐, 새벽 0시~4시 사이에 목적지 서브터미널로 간선수

송을 시작하여 오전 4시~6시 목적지 서브터미널에 도착한다. 본 연구에서 고려하고 있는 모형에서는 허브 터미널과 서브터미널 사이의 간선수송을 다루는 문제가 아니고, 물리적/구조적 제약으로 중앙의 허브 터미널이 여러 개로 분리되어 운영되는 경우에 분리된 터미널 간의 연계수송 과정에 초점을 맞추어서 입출고 트럭의 허브 터미널 할당 문제만을 다루는 것이다.

<Fig. 1>은 허브터미널 3개, 서브터미널 7개로 구성된 허브 앤 스포크 운영방식을 간단하게 보여주고 있다. 그림에서 보는 것처럼 출발지 서브터미널에서 허브에 도착한 트럭은 반드시 정해진 특정 허브터미널에 입고되어야 하고, 또한 목적지 서브터미널로 가는 트럭 역시 정해진 특정 허브 터미널에서 출고되어야 한다. 즉, 허브 내 각 터미널들에는 다수의 입하 도크와 출하 도크들이 존재하고, 전국의 모든 서브 터미널들에 대해 허브 내 입고 터미널과 출고 터미널이 미리 정해져 있다는 뜻이다. <Fig. 1>의 예는 서브터미널 1로부터 허브에 도착한 트럭은 반드시 허브터미널 2번으로 입고되어야 하고, 목적지가 서브터미널 4인 물량들은 모두 허브터미널 3번에서 출고되어야 함을 의미한다. 따라서 서브터미널 1에서 서브터미널 4로 수송해야 하는 택배 물량은 2번 허브터미널에 입고하여 하차한 뒤, 3번 허브터미널로 옮겨져 출고트럭에 상차하여 서브터미널 4로 수송된다. 이때, 입출고 허브터미널을 어떻게 할당하느냐에 따라 허브터미널 간 물량의 이동 거리에 따른 소요시간이 달라진다.

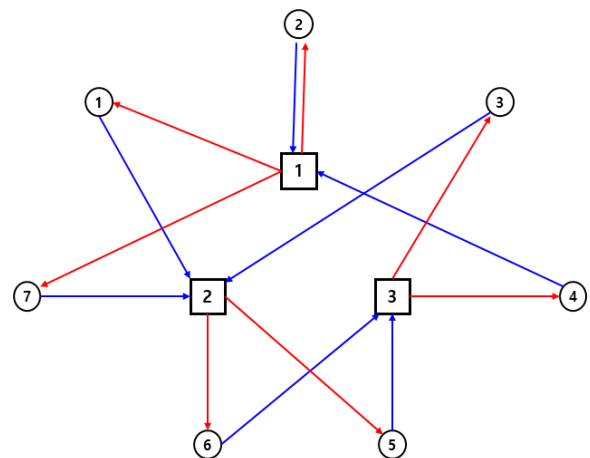


Fig. 1. 허브 앤 스포크 운영방식

따라서 허브 터미널에서 하루에 처리할 수 있는 용량(또는 시간)이 한정되어 있는 상황에서 허브 내 터미널 간 트럭의 이동거리를 최소화함으로써 비용과 시간을 최대한 줄이는 것이 택배터미널 운영의 효율성을 높이는

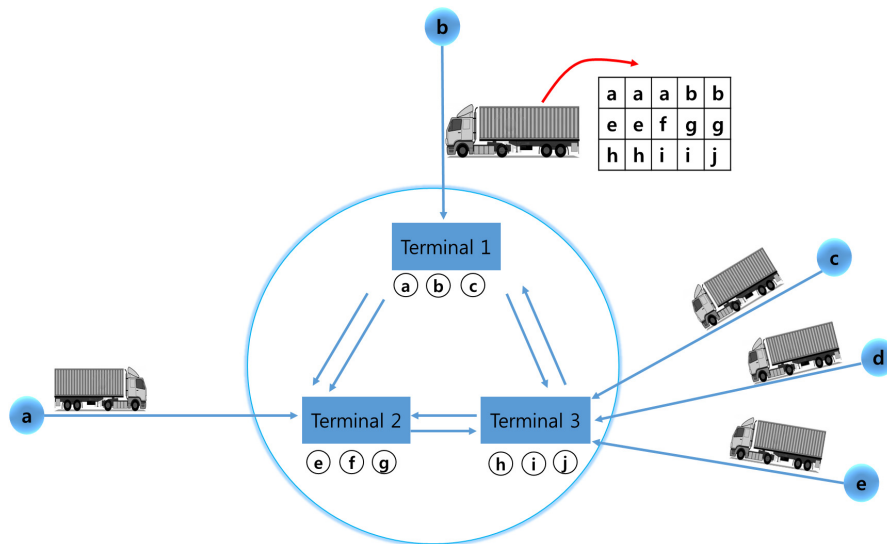


Fig. 2 허브터미널 입출차 처리 예

데 결정적인 역할을 한다. 따라서 각 서브 터미널에서 출발하여 허브에 도착한 트럭들을 허브 내 터미널들 중에 어느 곳으로 입차시켜야 하는지를 결정하는 것이 현실적으로 대단히 중요한 문제가 된다.

예를 들어, 다음 <Fig. 2>에서 보는 바와 같이 허브터미널이 3개의 터미널로 구성되어 있다고 가정하자. 만일 서브터미널 b에서 출발한 트럭이 허브내 터미널 1로 입차 되었다고 가정하자. 이 트럭에는 목적지가 다른 물량들이 섞여 있다. 이들 중에 목적지가 a, b, c인 물량은 터미널 1의 목적지 도크(Dock)에서 출하되지만, 목적지가 e, f, g인 물량들은 해당 도크가 있는 터미널 2로, 목적지가 h, i, j인 물량들은 터미널 3으로 다시 이동되어 출하되어야 한다.

허브 내 터미널들의 개수가 늘어날수록 터미널들간 물량이동이 많아지고 작업량도 늘어나기 때문에 작업시간과 비용이 증대되는 문제가 발생한다. 따라서 본 연구에서는 이를 해결하기 위해 서브터미널들의 위치와 개수, 허브 내 터미널들의 위치, 개수, 용량이 주어진 상태에서 허브 터미널 내 전체 물량의 이동거리 최소화를 목적으로 서브로부터 출발한 트럭들을 허브의 터미널에 할당하는 수리모형을 구축하고 해법을 개발하고자 한다. 또한 실제 데이터를 이용하여 모형과 해법을 적용해 봄으로써 허브 터미널의 효율적 운영전략을 도출하고자 한다.

2. 선행 연구

허브 터미널에서 하루에 처리할 수 있는 용량(또는 시간)이 한정되어 있는 상황에서 택배 기업들의 허브 터미

널 운영 효율성을 높이기 위해 허브 내 터미널 간 상하차 트럭들의 이동 거리를 최소화하는 문제를 직접 다룬 연구는 지금까지 진행된 것이 없었다. 다만, 재고보유비용을 줄이기 위해 저장 공간을 갖지 않는 배송센터에서 신속한 환적을 위해 배송센터에 도착하는 트럭을 어느 수신 도크에 할당하며, 또한 환적화물을 싣고 배송센터를 출발하는 트럭을 어느 선적 도크에 할당할 것인가를 결정하는 크로스도크 도어 할당문제(CDAP: cross-dock door assignment problem)가 본 연구에서 다루는 문제와 유사하고 이러한 문제들을 다룬 연구들은 많이 진행되어 왔다.

일반적으로 크로스도크에서는 수신도어(strip door)에 도착한 입차트럭으로부터 하차된 물건들이 목적지별로 분류 집하된 뒤 선적도어(stack door)로 옮겨져 출차트럭에 상차되어 출하된다. 입차트럭에서 하차된 물건들이 목적지별로 할당된 선적도어로 모두 옮겨질 때까지 수신도어와 선적도어들 사이에 지게차들이 왕복 운행하게 되는데, 지게차들의 총 운행 거리의 합을 최소로 하는 것이 바로 CDAP의 목표가 된다.

크로스도크 도어 할당문제를 처음으로 다룬 Peck(1983)은 크로스도크 시스템에서 화물들의 전체 환적시간을 최소화하는 정수계획법 모형을 제시하고 시뮬레이션 기법을 적용하여 풀었는데, 그 이후 많은 연구들이 이 문제를 다루어 오고 있다. Tsui & Chang(1992)은 크로스도킹 시스템 적용을 위한 도크-도어 할당문제에 대한 일반 모형을 제시하고 정수계획법 문제 해법을 위한 Branch and Bound 기반 해법을 제시하였다. Aickelin & Adewunmi (2006)은 Tsui & Chang(1992)이 제시한 모형에 대해 두 가지 해법을 제시하였는데, 보다 더 현실적인 목적함수를

다를 수 있도록 시뮬레이션 기법과 더불어 시뮬레이션 최적화 기법을 개념적으로 제시하였다. Oh et al.(2006)은 크로스도크 도어 할당문제를 우리나라 우체국의 우편물 집배송을 위한 상황에 적용하여 비선형 정수계획법모형을 제시하고 휴리스틱 해법을 제시하였다. Bozer & Carlo (2008)은 입차트럭 수와 수신도어의 수가 같고, 출차트럭 수와 선적도어의 수가 같다는 가정하에 정적모형과 동적 모형의 두 가지 모형을 제시하고, simulated annealing 해법을 적용하였다. Cohen & Keren(2009)은 트럭 용량 제약을 고려하여 동일 목적지를 갖는 물건들이 서로 다른 출하도크에 할당된 여러 트럭에 나누어 적재될 수 있다는 가정하에 비선형 정수계획법모형을 제시하고, 휴리스틱 해법을 사용하여 문제를 풀었다. Miao et al.(2009)은 운영시간을 고려하여 트럭 할당문제를 다루었는데, 트럭 도착 시간 정보가 주어져 있을 때, 특정 시간대에 둘 이상의 트럭이 동일한 도어에 할당될 수 없음을 다룬 정수계획법 수학적 모형을 제시하고 Tabu Search 방법을 이용한 해법을 제시하였다. Guignard et al.(2012)은 우리 연구와 유사하게 입차트럭이 배송센터 내 하나의 도어에만 들어올 수 있고, 출차트럭 역시 하나의 도어로부터 나갈 수 있다는 가정하에 문제를 제시하였다. 그러나 이 연구에서는 우리 연구와 달리 수신도어와 선적도어가 별도로 구분되어 있다는 가정하에 이진 정수계획법 모형을 제시하였다. Nassief et al.(2016)은 라그랑지안 완화기법(Lagrangian Relaxation Method)을 이용하여 최적해에 대한 하한을 구하기 위해 수학적 모형의 구조를 잘 이용할 수 있도록 새로운 형태의 정수계획법 모형을 제시하였다. 이들 연구에서는 상하차 시간과 입고도어에서 출고도어까지 이송시간 가중합을 최소화하는 문제를 다루면서 목적함수를 두 개의 이진변수 곱으로 나타낸 2차식 할당문제모형을 제시하고, 추가적인 변수를 도입하여 이를 다시 선형 형태의 혼합정수계획법 모형으로 변환시킬 수 있음을 보였다. 한편 Kusolpuchong et al.(2019)과 Sayed et al.(2020)은 크로스도킹 터미널에서 입출차 트럭의 스케줄링과 도어 할당 문제를 동시에 다루었다. Kusolpuchong et al.(2019)은 터미널에 제일 먼저 도착한 입차 트럭의 하차 시간부터 마지막 출차 트럭이 상차하여 터미널을 떠나는 시간까지 소요되는 시간 최소화, 화물들의 환적 처리를 위한 이동거리 최소화, 그리고 입차 트럭에서 하차한 화물이 출차 트럭에 즉시 상차하지 못할 경우 일시적 보관을 위한 사용공간의 최소화 등 세 가지 목적함수를 갖는 문제모형을 제시하고 이 문제를 풀기 위해 유전 알고리즘을 사용하였다. Sayed et al.(2020)은 하차시간, 입하도어에서 출하도어가

지 이동시간, 그리고 상차시간을 모두 합한 총처리시간 최소화를 목적함수로 갖는 모형을 제시하고 두 가지 유형의 메타휴리스틱 방법을 개발하였다.

지금까지 살펴본 크로스도크 도어 할당문제들은 차량의 입출차를 위한 도어가 크로스 도크 터미널 내에 존재하는 반면, 본 연구에서 다루는 문제에서는 입출차를 위한 허브 터미널들이 물리적으로 멀리 떨어져 있어 입출하 택배차량의 허브 터미널 할당이 어떻게 이루어지느냐에 따라 상하차를 위한 전체 물동량의 이동거리나 이동시간에 큰 차이를 보이게 된다. 따라서 본 연구에서 다루고 있는 택배차량의 허브 터미널 할당 문제가 최근들어 택배 기업들 사이에 매우 중요한 문제로 부각되고 있어, 본 연구가 허브터미널의 효율적 운영에 큰 도움이 되리라 여겨진다.

3. 문제 정의 및 수학적 모형

3.1 문제 정의

허브 터미널이 다수의 터미널들로 구성되어 있고, 국내 전역에 있는 수많은 서브 터미널로부터 출발한 입차트럭이 허브 터미널에 도착하여 택배물량을 하차하고, 터미널 내에서 이를 목적지별로 분류한 뒤 출차트럭에 상차시켜 목적지 서브 터미널로 간다. 그런데 입차트럭에는 목적지가 서로 다른 물량들이 혼재되어있고, 각각의 터미널에는 목적지별로 출하 도크가 분류되어 있다.

만일 특정 터미널에 하차한 물량들 중에 해당 터미널에 목적지 출하 도크가 존재하지 않는 경우, 출하 도크가 존재하는 다른 터미널로 물량을 이동시켜야 한다. 또한 허브의 각 터미널에는 하루에 취급할 수 있는 용량 한계가 있기 때문에 입차 트럭들을 어느 터미널에 할당시켜야 하는지, 그리고 출차 트럭을 어느 터미널에서 출하시켜야 하는지가 본 연구에서 다루는 문제가 된다. 허브 내에서 터미널들 간 물량의 이동은 터미널 내에서 분류를 위한 물량이동의 경우보다 비용이 훨씬 많이 들고 상하차 과정을 반복하며 작업시간과 작업량을 증가시키기 때문에, 터미널들 간 물량이동을 최소화 하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 허브 내에서 터미널들 간 물량의 전체 이동거리 합을 최소화하기 위해 입출차 트럭들의 터미널 최적 할당을 다루고자 한다. 입차 트럭과 출차 트럭을 어느 터미널에 할당하느냐에 따라 터미널들 간 물량 이동량이 좌우되기 때문에, 터미널 할당을 결정하는 것은 터미널 생산성 향상에 직접적인

영향을 미치게 된다. 본 연구에서 다루고자 하는 문제를 정의하기 위해 다음과 같이 몇 가지 가정을 한다.

첫째, 서브 터미널 위치와 개수, 허브 터미널의 위치와 개수, 용량, 허브 터미널들 간의 거리가 알려져 있고, 서브 터미널 o-d pair간 1일 수송물량이 알려져 있다. 둘째, 출발지 서브 터미널로부터 허브에 도착한 트럭은 단 하나의 터미널에만 입차할 수 있고, 그리고 목적지 서브 터미널로 가는 트럭 역시 단 하나의 허브 터미널에서만 출차할 수 있다. 즉, 출발지별 입하 도크가 오직 하나의 터미널에만 존재하기 때문에 출발지 서브 터미널에서 온 수송물량은 여러 터미널에 분산되지 않고 하나의 터미널에 입고된다. 또한 목적지별 출하 도크도 오직 하나의 터미널에만 존재하기 때문에 특정 목적지로 가는 물량은 하나의 터미널로부터만 출고될 수 있다.

이러한 가정하에서 본 연구에서 다루고자 하는 문제는 허브터미널 내에서 전체 물동량의 이동거리 합을 최소화 하면서 출발지 서브 터미널로부터 온 트럭의 하차를 위해 어느 허브 터미널에 할당할 것이냐, 그리고 목적지 서브 터미널로 보내는 트럭의 상차를 위해 어느 허브 터미널에 할당할 것이냐를 결정하는 것이다.

3.2 터미널 할당을 위한 수리모형

이 문제에 대한 수학적 모형을 제시하기 위해 먼저 수학적 모형에 필요한 기호와 결정변수를 다음과 같이 정의한다.

- S : 출발지 서브 터미널 집합
- D : 목적지 서브 터미널 집합
- T : 허브 터미널 집합
- Q_i : 허브 터미널 i 의 1일 처리용량 (시간 \times 택배상자 수량)
- a_i : 허브 터미널 i 에서 택배상자 1개 하차하는데 소요되는 시간
- b_i : 허브 터미널 i 에서 택배상자 1개 상차하는데 소요되는 시간
- f_{kl} : 출발지 서브 터미널 k 에서 목적지 서브 터미널 l 로 수송해야 하는 1일 택배물량
- d_{ij} : 허브 터미널 i 와 허브 터미널 j 사이의 거리

(결정변수)

- x_{ki} : 출발지 서브 터미널 k 에서 출발한 차량이 허브 터미널 i 에 입차하면 1, 그렇지 않으면 0

- y_{li} : 목적지 서브 터미널 l 로 향하는 차량이 허브 터미널 i 에서 출차하면 1, 그렇지 않으면 0

위에서 정의한 기호와 결정변수를 사용하여 본 연구에서 다루는 터미널 할당문제에 대한 수학적 모형을 작성하면 (P1)과 같다.

$$(P1) \quad \text{Min} \sum_{i \in T} \sum_{j \in T} \sum_{k \in S} \sum_{l \in D} d_{ij} f_{kl} x_{ki} y_{lj} \quad (1)$$

s.t.

$$\sum_{i \in T} x_{ki} = 1, \quad k \in S \quad (2)$$

$$\sum_{i \in T} y_{li} = 1, \quad l \in D \quad (3)$$

$$a_i \sum_{k \in S} \sum_{l \in D} f_{kl} x_{ki} + b_i \sum_{k \in S} \sum_{l \in D} f_{kl} y_{li} \leq Q_i, \quad i \in T \quad (4)$$

$$x_{ki}, y_{li} \in \{0, 1\}, \quad i, j \in T, k \in S, l \in D \quad (5)$$

목적함수식 (1)은 전체 택배수송물량들의 하차/상차를 위한 허브 터미널간 이동거리와 물동량의 곱을 최소화한다는 것을 나타낸다. 즉, 출발지 서브 터미널 k 에서 목적지 서브 터미널 l 로 보내는 1일 택배수송량을 허브터미널 i 에 입고하여 하차한 뒤 허브 터미널 j 에서 상차하여 출고할 때 허브터미널 내에서 이동거리 총합은 $d_{ij} f_{kl}$ 로 주어지기 때문에 목적함수식이 (1)과 같이 구성된다. 제약식 (2)는 출발 서브 터미널로부터 온 트럭은 반드시 하나의 허브 터미널에 할당되어야 함을 의미하고, 제약식 (3)은 목적지 서브 터미널로 가는 트럭 역시 단 하나의 허브 터미널에서 출발해야 함을 뜻한다. 제약식 (4)는 허브 터미널의 용량제약조건을 나타낸다. 제약식 (5)는 결정변수가 이진변수임을 규정하고 있다.

문제 (P1)은 목적함수식이 비선형형태로 표현되어 있다. 이를 선형 형태로 만들기 위해 새로운 이진변수 z_{kijl} 를 추가로 도입하여 목적함수식에 다음과 같이 반영한다.

$$z_{kijl} = x_{ki} y_{lj}$$

그리고 제약조건식에서 다음 두 식을 추가하면 선형 형태의 수학적 모형으로 변환시킬 수 있다.

$$z_{kijl} \geq x_{ki} + y_{lj} - 1$$

$$\sum_{i \in T} \sum_{j \in T} z_{kijl} = 1$$

새로운 결정변수 z_{kijl} 은 출발지 서브 터미널 k 에서 목적지 서브 터미널 l 로 수송할 택배물량 f_{kl} 을 차량에 싣고 허브 터미널 i 에 입차한 뒤, 허브 터미널 j 에서 출차하여 목적지 서브 터미널 l 로 가면 1 그렇지 않으면 0인 이진변수로 정의된다. 새로운 이진변수 z_{kijl} 를 사용하여 비선형 모형 (P1)을 선형모형으로 변환시키면 0-1 정수계획법문제 (P2)와 같게 된다.

(P2)

$$\text{Min} \sum_{i \in T} \sum_{j \in T} \sum_{k \in S} \sum_{l \in D} d_{ij} f_{kl} z_{kijl} \quad (6)$$

s.t.

$$\sum_{i \in T} x_{ki} = 1, \quad k \in S \quad (2)$$

$$\sum_{i \in T} y_{li} = 1, \quad l \in D \quad (3)$$

$$a_i \sum_{k \in S} \sum_{l \in D} f_{kl} x_{ki} + b_i \sum_{k \in S} \sum_{l \in D} f_{kl} y_{li} \leq Q_i, \quad i \in T \quad (4)$$

$$z_{kijl} \geq x_{ki} + y_{lj} - 1, \quad i, j \in T, k \in S, l \in D \quad (7)$$

$$\sum_{i \in T} \sum_{j \in T} z_{kijl} = 1, \quad k \in S, l \in D \quad (8)$$

$$x_{ki}, y_{li}, z_{kijl} \in \{0, 1\}, \quad i, j \in T, k \in S, l \in D \quad (9)$$

제약식 (7)은 x_{ki} 와 y_{lj} 둘 다 1일 때만 z_{kijl} 이 1의 값을 가질 수 있음을 나타내며, 제약식 (8)은 제약식 (7)과 함께 모든 출발지-목적지 서브터미널들간 택배수송물량은 반드시 하나의 허브 터미널에 입차한 뒤 하나의 허브 터미널에서 출차해야 함을 보장하는 식이다.

만일 z_{kijl} 를 이진변수가 아닌 일반변수로 간주하여 $z_{kijl} = f_{kl} x_{ki} y_{lj}$ 로 하고, 제약조건식 (7)-(8) 대신에 식 (11)을 제약조건식에 추가하면, 선형 형태의 혼합정수계획법 모형 (P3)를 만들 수 있다.

(P3)

$$\text{Min} \sum_{i \in T} \sum_{j \in T} \sum_{k \in S} \sum_{l \in D} d_{ij} z_{kijl} \quad (10)$$

s.t.

$$\sum_{i \in T} x_{ki} = 1, \quad k \in S \quad (2)$$

$$\sum_{i \in T} y_{li} = 1, \quad l \in D \quad (3)$$

$$a_i \sum_{k \in S} \sum_{l \in D} f_{kl} x_{ki} + b_i \sum_{k \in S} \sum_{l \in D} f_{kl} y_{li} \leq Q_i, \quad i \in T \quad (4)$$

$$M(1 - x_{ki}) + M(1 - y_{lj}) + z_{kijl} \geq f_{kl}, \quad i, j \in T, k \in S, l \in D \quad (11)$$

$$x_{ki}, y_{li} \in \{0, 1\}, \quad z_{kijl} \geq 0, \quad i, j \in T, k \in S, l \in D \quad (12)$$

4. 모형 적용 및 해석

4.1 수치 예

출발지/목적지 서브 터미널 개수는 각각 10개씩으로 하고, 허브 터미널 개수는 3개로 한다. 허브 터미널의 용량은 모두 동일하게 설정하고, Guignard et al.(2012)과 같은 방법으로 허브 터미널 용량을 결정한다. 전체 서브 터미널 택배수송량 총합을 허브 터미널 개수로 나누어 여기에 택배물량 상하차시간을 고려하여 계산된 값에 여유용량을 10%, 15%, 20% 등 추가하여 세 가지 유형으로 설정한다. 예를 들어 택배수송량 총합이 1000, 허브터미널이 3개이며, 택배물량 상하차시간 합이 4라 가정하고 용량여유분을 20%로 설정할 때, 각각의 허브 터미널 용량은 $1000/3 \times 4 \times 1.2 = 1600$ 으로 설정한다.

Table 1. 허브 터미널간 거리

허브	좌표	허브터미널 간 거리		
		1	2	3
1	(87,52)	0	39	30
2	(65,85)	39	0	26
3	(91,82)	30	26	0

허브 터미널간 거리는 먼저 각 허브 터미널 위치를 [50,100] 범위 내의 정수값으로 x, y 좌표값을 임의로 생성하여 유클리드 거리로 구하였다(Table 1). 편의상 출발지 서브 터미널 개수와 목적지 서브 터미널 개수를 동일하게 설정하고, 다만 출발지 서브 터미널과 목적지 서브 터미널은 서로 다르다고 가정한다. 그리고 서브터미널들 간에 매일 택배수송물량이 발생하는 것으로 가정하고, [0,100] 사이 임의의 정수를 생성하여 택배수송량을 발생시킨다(Table 2). 허브 터미널에서의 택배 물량 상하차 시간 데이터는 현실 상황을 반영하여 상하차시간이 하차시간의 1배, 2배, 3배, 4배 등으로 구분하여 설정하고 모두 12가지 유형의 문제들을 풀어보고자 한다.

4.2 해법 개발 및 적용

예제문제들을 풀기 위한 해법으로 본 연구에서는 엑셀 추가기능 프로그램인 Analytic Solver 프로그램을 이용하였다. 이를 위해 먼저 정수계획법 수학적 모형인 (P2)를 엑셀 워크시트에 엑셀 입력 모형으로 설계한 뒤 데이터를

Table 2. 서브 터미널간 택배수송물량

목적 터미널 출발 터미널	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	23	100	15	65	80	99	77	1	87	18
2	20	79	87	90	74	23	74	7	81	94
3	87	28	56	94	7	62	72	1	72	92
4	2	58	9	23	72	94	82	51	0	44
5	24	0	79	45	29	31	18	82	6	29
6	60	45	12	97	43	86	44	52	83	39
7	12	57	70	54	46	22	19	38	51	70
8	9	88	74	92	36	80	69	68	64	33
9	45	22	45	91	71	50	79	34	96	51
10	8	60	86	97	0	33	7	32	61	5

Table 3. 여유용량, 상하차시간 비율에 따른 결과

비율	여유 용량	10%		15%		20%	
		허브터미널 용량	목적 함수값	허브터미널 용량	목적 함수값	허브터미널 용량	목적 함수값
동일		3760	85179	3932	85179	4102	82742
2배		5640	85427	5898	84429	6153	81839
3배		7520	85427	7864	84614	8204	81797
4배		9400	85929	9830	84614	10255	79994

입력하여 엑셀에서 Analytic Solver 프로그램을 구동하여 최적해를 구하였다. 허브터미널 여유 용량 3가지 유형과 상하차 시간 비율 4가지 유형의 조합에 따라 모두 12개 유형의 문제를 풀어 본 결과, 허브터미널 내에서 상하차를 위한 (물량×이동거리) 총합을 나타내는 최적 목적함수 값이 <Table 3>과 같이 나왔다.

<Table 3>을 보면 허브터미널의 여유용량이 증대될수록 허브터미널 내 이동거리의 합이 더 적어져 허브터미널의 효율적 운영이 가능함을 알 수 있다. 이는 택배 산업 현실에서 경쟁 기업들간 제휴에 의해 허브터미널을 공동 이용할 경우 허브터미널 운영 효율성을 높일 수 있음을 시사한다.

전체 12가지 유형의 문제들 중에서 상차시간이 하차시간의 3배일 때, 허브터미널 여유용량이 10%, 15%, 20%일 경우 각각의 입출고 터미널 최적 할당 결과를 보면 <Table 4>~<Table 6>과 같다.

Table 4. 여유용량 10% 일 때 입출고 허브 터미널 할당

서브터미널 허브	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
입고 터미널	1	2	2	1	3	3	3	3	2	3
출고 터미널	2	1	3	3	1	1	2	3	2	2

Table 5. 여유용량 15% 일 때 입출고 허브 터미널 할당

서브터미널 허브	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
입고 터미널	2	3	2	2	1	3	1	3	2	3
출고 터미널	2	3	1	3	2	2	2	1	3	1

Table 6. 여유용량 20% 일 때 허브 입출고 터미널 할당

서브터미널 허브	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
입고 터미널	2	3	3	2	1	3	3	2	3	3
출고 터미널	3	2	1	3	2	2	2	1	3	1

<Table 6>을 보면, 서브터미널 1에서 출발하여 허브터미널에 도착한 트럭은 반드시 터미널 2에 입고해야 하고, 한편 목적지 서브터미널 1로 보내는 수송물량은 모두 반드시 허브터미널 3에서 출고해야 한다. 즉, 서브터미널 1에서 출발하는 물량은 목적지와 상관없이 항상 허브터미널 2에 입차해야 하며, 서브터미널 1에 도착해야 하는 물량은 출발지와 상관없이 반드시 허브터미널 3에서 출고해야 한다는 뜻이다. 마찬가지로 서브터미널 5에서 출발한 물량은 반드시 허브터미널 1에 입고해야 하며, 목적지가 서브터미널 5인 물량들은 허브터미널 2에서 출고해야 한다는 뜻이다.

Table 7. 여유용량 10%일 때 용량확장 효과 비교(상하차 시간 비율: 3배인 경우)

목적함수값	현재 시스템		Hub 1 확장		Hub 2 확장		Hub 3 확장	
	85427		85427		84429		82810	
	사용량	가용량	사용량	가용량	사용량	가용량	사용량	가용량
Hub 1	5725	7520	5725	8204	5293	7520	5725	7520
Hub 2	7505	7520	7505	7520	7961	8204	6725	7520
Hub 3	7286	7520	7286	7520	7262	7520	8066	8204
	20516		20516		20516		20516	

Table 8. 여유용량 10%일 때 용량확장 효과 비교 (상하차 시간 비율 : 4배인 경우)

목적함수값	현재 시스템		Hub 1 확장		Hub 2 확장		Hub 3 확장	
	85929		83595		81839		82810	
	사용량	가용량	사용량	가용량	사용량	가용량	사용량	가용량
Hub 1	7300	9400	10077	10255	6278	9400	7300	9400
Hub 2	9344	9400	6278	9400	10077	10255	8372	9400
Hub 3	9001	9400	9290	9400	9290	9400	9973	10255
사용량 계	25645		25645		25645		25645	

한편 택배 물량의 증대로 기존 허브 터미널 용량이 부족할 경우 허브 터미널을 추가 신축하거나 기존 터미널 용량을 확장하는 방안을 생각해 볼 수 있다. 만일 기존 허브 터미널 용량을 확장하고자 한다면, 어느 허브 터미널의 용량을 확장하는 게 가장 효율적인지 알아보려고 하였다. 기존 허브 터미널들의 용량 확장 비용이 동일하다고 가정하고, 12가지 유형 각각에 대해 현재 용량보다 10% 더 증대시키는 문제들을 풀어보았다. 12가지 유형 중 허브 터미널 여유용량이 10%이고, 상하차 시간 비율이 3배인 경우와 4배인 경우의 결과가 <Table 7>과 <Table 8>에 각각 나타나 있다.

<Table 7>을 보면, 여유용량을 10% 추가 확장하는 비용이 모든 허브터미널 간에 동일하다고 가정할 때, 허브터미널 1의 경우 추가용량을 확장하더라도 현재 시스템에 비해 개선되는 효과가 전혀 없다. 반면 터미널 2와 3의 여유용량을 각각 증대시킬 때 현재보다 허브터미널 내 이동거리의 합이 더 적어져 개선효과가 나타남을 알 수 있다. 특히 허브터미널 3의 여유용량을 증대시키는 것이 효과가 가장 크게 나타나기 때문에, 제한된 예산하에서 용량 확장을 고려하고자 할 때 허브터미널 3의 용량을 추가 확장하는 게 가장 효율적임을 알 수 있다.

한편 <Table 8>은 상차시간이 하차시간의 4배이고, 허브 터미널 여유용량이 10%인 문제에 대해 허브터미널 1, 2, 3의 여유용량을 현재보다 각각 10% 더 증대시키는 경우에 대해 각각의 문제를 풀어본 결과이다. 용량확장에 따른 투입비용이 터미널들간에 동일하다고 가정할 때, 허브터

미널 2의 용량을 확장하는 것이 가장 효율적임을 보여주고 있다. 여기서 목적함수값이 의미하는 것은 허브터미널 내에서 상하차를 위한 (물량×이동거리) 총합을 나타낸다.

5. 결 론

본 연구에서는 택배기업들이 서브 터미널들간 택배물량 수송을 위해 허브터미널 내에서 전체 물동량의 이동거리 합을 최소화 하면서 출발지 서브 터미널로부터 온 트럭을 어느 허브 터미널에 입차시키고 또한 목적지 서브 터미널로 보내는 트럭을 어느 허브 터미널로부터 출차시켜야 하는지 결정하는 터미널 할당문제를 다루었다. 먼저 비선형 형태로 표현되는 수학적 모형을 선형 모형으로 변환시켜 제시하였고, 엑셀을 이용한 해법을 개발하였다. 본 연구에서 제시한 모형의 현실 적용 가능성을 알아보기 위해 허브터미널 여유 용량 3가지 유형과 상하차 시간 비율 4가지 유형의 조합에 따라 모두 12개 유형의 예제 문제를 만들어 적용하여 분석해 보았다. 분석 결과, 현재 시스템에서 네트워크 확장을 고려하는 경우 허브터미널 각각에 대해 용량 확장 비용이 동일하다고 가정하고 허브터미널 중 한 곳의 용량을 확장하고자 할 때 어느 허브 터미널의 용량을 확장하는게 가장 효율적인지 파악할 수 있었다. 그리고 허브터미널의 여유용량이 늘어날수록 허브터미널 내 택배물량의 이동거리 합이 더 작아져 허브터미널의 효율적 운영이 가능함을 알 수 있었다. 이는 택배 산업

현실에서 경쟁 기업들간 제휴에 의해 허브터미널을 공동 이용한다고 할 경우 허브터미널의 운영 효율성을 높일 수 있음을 시사하는 것으로서 본 연구가 현실 적용 측면에서 의미있는 결과를 제시한다고 볼 수 있다.

한편 본 연구에서 다루는 문제 모형은 출발지 서브 터미널로부터 허브에 도착한 트럭은 단 하나의 터미널에만 입차할 수 있고, 목적지 서브 터미널로 가는 트럭 역시 단 하나의 허브 터미널에서만 출차할 수 있다는 가정하에 제시하고 있다. 그러나 현실적인 적용가능성을 좀더 향상시키기 위해 본 연구를 확장한 모형을 다루는 것이 필요할 것 같다. 이를 위해 추후 연구할 내용은 출발지별 입하 도크와 목적지별 출하 도크가 복수의 터미널에 존재하는 경우이다. 즉, 출발지 서브 터미널로부터 허브에 도착한 트럭은 여러 터미널에 입차할 수 있고, 목적지 서브 터미널로 가는 트럭 역시 여러 허브 터미널에서 출차가 가능한 문제 유형으로서, 본 연구에서 제시한 문제보다 문제의 복잡성이 많이 커지게 된다. 앞으로 이 연구 과제를 진행하여 분석 결과를 제시하는 것이 의미있는 작업이 되리라 생각된다.

REFERENCES

- [1] Aickelin & Adewunmi (2006). Simulation optimization of the crossdock door assignment problem. *Proceedings of the 2006 OR Society Simulation Workshop*.
- [2] Bozer, Y. A. & Carlo, H. J. (2008). Optimizing inbound and outbound door assignments in less-than truck load crossdocks. *IIE Transactions*, 40(11), 1007-1018.
- [3] Cohen, Y. & Keren, B. (2009). Trailer to door assignment in a synchronous cross-dock operation. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 5(5), 574-590.
- [4] Guignard, M., Hahn, P. M., & Pessoa, A. A. (2012). Algorithm for the cross-dock door assignment problem. *Proceedings of the Fourth International Workshop on Model-Based Metaheuristics*, Brazil.
- [5] Kusolpuchong, S., Chusap, K., Alhawari, M., & Suer, G. (2019). A genetic algorithm approach for multi objective cross dock scheduling in supply chains. *Procedia Manufacturing*, 39, 1139-1148.
- [6] Miao, Z., Lim, A., & Ma, H. (2009). Truck dock assignment problem with operational time constraint within crossdocks. *European Journal of Operational Research*, 192, 105-115.
- [7] Nassief, W., Contreras, I., & As'ad, R. (2016). A mixed-integer programming formulation and lagrangean relaxation for the cross-dock door assignment problem. *International Journal of Production Research*, 54(2), 494-508.
- [8] Nassief, W., Contreras, I., & Jaumard, B. (2018). A comparison of formulations and relaxations for cross-dock door assignment problems. *Computers and Operations Research*, 94, 76-88.
- [9] Oh, Y., Hwang, H., Cha, C. N., & Lee, S. (2006). A dock-door assignment problem for the Korean mail distribution center. *Computers & Industrial Engineering*, 51(2), 288-296.
- [10] Peck, K. E. (1983). Operational analysis of freight terminals handling less than container load shipments, PhD Dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL 61801.
- [11] Sayed, S. I., Contreras, I., Diaz, J. A., & Luna, D. E. (2020). Integrated cross-dock door assignment and truck scheduling with handling times. *TOP*, 28, 705-727.
- [12] Tsui, L. Y. & Chang, C. H. (1992). An optimal solution to a dock door assignment problem. *Computers and Industrial Engineering*, 23(1-4), 283-286.



고 창 성

KAIST 산업공학 박사
현재: 경성대학교 산업경영공학과
교수
관심분야: 물류시스템, SCM



정 기 호

KAIST 경영과학 박사
현재: 경성대학교 경영학과 교수
관심분야: SCM, 네트워크 최적화