

택배 서비스 네트워크 설계를 위한 수리적 모형 개발

김성우¹ · 권영준² · 최서현³ · 이준섭⁴ · 고승윤⁵ · 정병도⁴ · 문일경² · 고창성^{6*}

¹조지아텍 산업시스템공학부 / ²서울대학교 산업공학과 / ³SK Hynix

⁴연세대학교 산업공학과 / ⁵고려대학교 산업경영공학부 / ⁶경성대학교 산업경영공학과

Development of Mathematical Models for Parcel Delivery Service Network Design

Sungwoo Kim¹ · Yeong Jun Kwon² · Seohyeon Choi³ · Jun Seop Lee⁴

Seung Yoon Ko⁵ · Byung Do Chung⁴ · Ilkyeong Moon² · Chang Seong Ko^{6*}

¹H. Milton Stewart School of Industrial and Systems Engineering, Georgia Institute of Technology College of Engineering

²Department of Industrial Engineering, Seoul National University

³SK Hynix

⁴Department of Industrial Engineering, Yonsei University

⁵School of Industrial Management Engineering, Korea University

⁶Department of Industrial and Management Engineering, Kyung Sung University

The purpose of this paper is to propose an operations management methodology for a parcel to enhance competitiveness of the courier industry. Structures of Hybrid Hub-and-Spoke and Mega-hub networks for courier industry are analyzed. For deriving an optimal strategy for efficient parcel delivery, mathematical models for both network are proposed. Experiments with real-world data from a leading shipping company are conducted by optimization software to compare suitability of the networks. Two network models are compared to get managerial insights for the current and future scenarios.

Keywords: Network Model, Mega-Hub, Hybrid Hub-and-Spoke, Parcel Delivery

1. 서 론

2016년 말 기준 국내 택배시장 매출 규모는 약 4조 7천억 원, 물량으로 약 20.5억 개를 처리하였으며, 전년 대비 각각 9.22%, 12.7% 증가 하였다(Korea Integrated Logistics Association, 2017). 이는 국내 경제활동인구 1인당 연 75.7회 택배를 이용한 것으로 전년 대비 7.8회 증가한 수치다. 모바일을 포함한 온라인 시장의 지속적인 성장이 매년 10% 이상의 택배시장 성장을 견인하고 있으며 이러한 증가 추이는 향후 지속될 전망이다. 이러

한 증가량과는 반대로 택배의 2016년 평균단가는 전년 대비 3.09% 감소한 2,318원으로 하락하여 수익성에 큰 타격을 받고 있다.

본 연구의 목적은 택배업계의 경쟁력 제고 방안의 일환으로 기존 물류거점의 입지, 용량, 네트워크 구조 등 물류거점화 의 사결정을 위한 최적화 수리 모델을 개발하고, 실제 데이터를 기반으로 택배 수요 변화에 따른 택배 네트워크의 운영 효율을 극대화하기 위한 택배 네트워크 최적화 전략을 도출하는 것이다. 구체적으로 미래 수요 데이터, 허브와 서브의 지리적 위치

본 논문은 정석물류학술재단 지원에 의하여 연구되었음(2016-11-1670).

* 연락저자 : 고창성 교수, 48434 부산광역시 남구 수영로 309 경성대학교 산업경영공학과, Tel : 051-663-4724, Fax : 051-621-2454,

E-mail : csko@ks.ac.kr

2018년 7월 20일 접수; 2019년 1월 15일 수정본 접수; 2019년 1월 16일 게재 확정.

및 운영비용 데이터, 터미널별 가용한 간선 제약 등을 기반으로 중장기 택배 거점의 입지와 거점 즉 터미널 용량의 적정성을 평가한다. 특히, 본 연구에서는 택배 네트워크 최적화를 위한 수리적 모형에 기초하여 가장 보편적인 물류 거점 전략으로 평가되는 메가 허브 모델과 일반 허브 모델 운영 방식의 효율성을 비교, 분석하고, 지역별 택배 물동량의 중장기 수요에 측 결과에 기초한 거점별 입지 및 용량 변화에 따른 시나리오 분석을 통해 최적의 물류 거점 전략과 운영 대안을 제시한다.

이후의 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 제 2장은 본 논문의 연구와 관련된 기존 연구들을 소개한다. 제 3장에서는 일반 허브 모델 네트워크 모델을 설명하고 제 4장에서는 메가 허브 모델 네트워크 모델을 설명한다. 제 5장에서는 개별 시나리오를 바탕으로 실험 결과를 분석하고 시사점에 대해 제시한다. 제 6장은 결론으로 연구 내용을 요약하며 논문을 마친다.

2. 선행 연구 분석

국내에서 수행된 연구를 살펴보면, Lee and Gang(1990)은 전국 5개 도시를 대상으로 복합 화물터미널 입지선정 의사결정문제를 혼합 정수계획법으로 모형화하였다. 이후 Kim *et al.*(1998)의 국내의 화물 수송 계획 및 운영에 관한 정량적 모형에 대한 조사 연구를 시작으로 Kim *et al.*(2000; 2001)의 연구에서는 물류업체의 실제 자료를 이용하여 택배의 효율적 간선수송을 위해 순환경로, 단일 화물집중센터, 중계 지점의 활용 등의 세 가지 대안들을 비교 평가하였다. 또한 Chung and Ko(2002)의 연구는 간선운송 비용과 연계운송 비용의 합을 최소로 하는 택배 네트워크 설계 문제를 다룬 연구로서 화물터미널의 개수와 전국의 영업소를 각각 어떤 터미널에 할당할 것인가를 분석하였다. Lee *et al.*(2005)은 용량제약과 직접수송이 있는 메가 허브 모델 네트워크 설계에 대한 연구를 수행하였다.

Lim *et al.*(2007)의 연구에서는 온라인 상권지도도를 제시하면서 배송수요의 증가에 따른 택배업체의 단기적, 중장기적 대응책을 실증 조사하였다. 특히 온라인 매출증가에 따라 배송물량이 증가하게 되고 이는 배송가격을 인하시켜 소비자 측면에서 서비스 품질을 향상시키는 과정을 설명하였다. 또한 택배요금 증가에 따른 국내 택배업체의 대응방안으로 단기적인 지역별 대응과 중장기적인 대응 부재 등을 지적하였다. Lee *et al.*(2010)은 최적화/시뮬레이션 반복기법을 활용하여 복수 화물터미널을 갖는 택배 서비스 네트워크 재설계 문제를 다루었으며, Choi(2011)는 수요변화에 따른 허브 터미널의 물량 처리능력의 중요성을 제시함으로써 단기적인 운용 변수들의 조정과 중장기적인 택배 네트워크의 구조변화를 어느 시점에 어떤 방식으로 진행하여야 할지에 대한 전략적 의사결정을 제시하였다. Chung *et al.*(2011)은 영업소 통폐합과 터미널 공유를 고려한 택배기업의 전략적 재휴를 위한 네트워크 설계에 관한 연구를 수행하였다.

물류거점 전략을 평가하기 위한 수리적 모형을 정리한 대표

적인 해외문헌은 Daskin(2013)의 저서 “Network and Discrete Location : Models, Algorithms and Applications”에서 찾아볼 수 있는데, 물류거점의 최적 입지 선정을 위한 다양한 방법론과 거점과 배송전략을 동시에 평가할 수 있는 모형 등 물류거점화 전략을 평가하기 위한 수리적 모형과 다양한 응용사례를 제시하였다.

동 연구주제와 관련하여 가장 유사한 해외 연구사례로는 최소의 비용으로 화물터미널의 입지선정을 다룬 Schneider *et al.*(1972)의 연구를 시작으로 Powel(1986)이 수행한 미국 소화물 혼적운송(Less than Truckload, LTL) 회사의 운송네트워크 최적화를 위한 수리적 평가모형이 있다. Min(1994)은 Schneider *et al.*(1972)의 연구를 확장한 연구로서 화물터미널의 입지선정 및 할당문제를 multi-objective 관점으로 접근하였으며, Lumsden *et al.*(1999)는 Hub-and-Spoke 네트워크 구조에서 복수의 허브를 가지는 Hub-and-Spoke와 Short-cut 접근방식을 이용하여 간선 차량운송 네트워크에 대해 연구하고 이를 SKF 유럽에 적용시킨 사례를 제공하였다.

Cheung *et al.*(2002)은 홍콩 DHL을 대상으로 택배서비스 네트워크 문제를 다룬 연구로서 수주마감시간에 따른 서비스 영역과 신뢰도를 분석하였다. Lim *et al.*(2011)은 Hub-and-Spoke 구조에서 온라인 쇼핑의 성장에 따른 택배물량 증가에 대응하여 택배네트워크의 대응방안으로 Main Hub의 처리용량 증설, Sub Hub(Local Hub)의 신설 등의 시나리오를 구성하였으며, 시뮬레이션을 통해 네트워크의 신뢰도를 높이며 효율적 비용을 갖는 방안에 대해 연구하였다. Lee and Moon(2014)는 한국 우편물류 시스템에 혼합 Hub-and-Spoke 시스템을 적용하여 우편교환센터 위치를 결정하는 수리모형을 개발하였다.

물류시스템 운영관련 기존 해외 문헌은 대부분 지역영업소(Depot)를 중심으로 화물의 집하 또는 배송을 위한 차량의 최소경로문제(Vehicle Routing Problem, VRP)에 초점을 두고 있으며, 집배송 업무 수행 시 다양한 제약조건의 고려여부에 따라 다양한 형태의 수리적 모형과 그 해법이 제시되었다. 대표적 사례로 Leung *et al.*(1990)은 지점 대 지점간의 운송문제를 순환경로로 해결하는 수리적 모형과 해법을 제시하였다.

3. 일반 허브 모델 네트워크

3.1 일반 허브 모델 네트워크 문제 정의

본 연구에서는 국내의 대표적인 택배 기업 K사를 바탕으로 연구를 진행하였다. K사는 전국적인 택배 시스템을 구축하고 있으며, 100개 이상의 서브 및 허브를 운영하고 있다. 일반 허브 모델 네트워크는 현재 택배업체에서 기본적으로 운영하는 네트워크 구조로서, 서브에서 출발한 물량이 예하관계에 있는 허브들을 거쳐 다른 서브로 배송되는 네트워크 형태이다. 예하관계란, 허브에서 기본적으로 집하를 담당하는 서브가 있을 때, 그 허브와 서브를 예하관계에 있다고 정의한다. 기본적인 물량 흐름은

서브-허브-허브-서브이며, 첫 번째 허브는 각 서브물량의 집합을 담당하며 두 번째 허브는 각 서브 물량의 배송을 담당한다. 이 때, 집하 또는 배송 물량이 충분한 경우는 하나의 허브를 거쳐 서브끼리 배송할 수 있다. 이 형태의 네트워크는, Lee and Moon (2014)에서 다룬 전통적인 혼합(Hybrid) Hub-and-Spoke 네트워크와 형태가 유사하다고 할 수 있다.

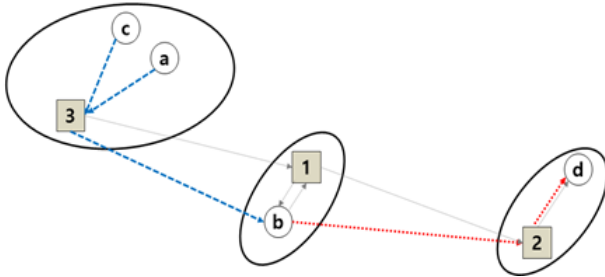


Figure 1. Example of the Hub-and-Spoke network

<Figure 1>은 네트워크상에서 물량 흐름의 예를 보여주고 있으며, 사각형 기호는 허브, 동그라미 기호는 서브를 나타낸다. 원래의 일반 허브 모델 네트워크에서는 서브 b에서 서브 d로 물량이 이동할 때 서브 b-허브 1-허브 2-서브 d 흐름으로 배송되어야 한다. 그러나 전통적인 혼합 Hub-and-Spoke 네트워크와 다르게 서브 b에서 서브 d로 배송하는 물량이 간선 차량 한 대의 분량을 채울 수 있을 경우, 위의 경로가 아닌 서브 b에서 허브 2로 가는 간선을 생성하여 서브 b-허브 2-서브 d 흐름으로 물량이 이동할 수 있도록 배송 경로를 수정할 수 있다. 또한, 원래의 일반 허브 모델 네트워크에서는 서브 c에서 서브 b, 서브 a에서 서브 b로 물량이 이동할 때 서브 c-허브 3-허브 1-서브 b, 서브 a-허브 3-허브 1-서브 b 흐름을 거쳐 배송되어야 한다. 이 때, 이 물량이 간선 차량 한 대의 분량을 채울 수 있을 경우 두 개의 물량을 합쳐서 허브 3에서 집하하고 바로 서브 b로 배송하는 형태도 가능하다. 이러한 네트워크 구조는 서브-허브 간의 예하관계를 결정하는 네트워크 설계와 택배 물량의 이동을 결정하는 트럭 운영관리의 2단계 문제로 나누어 접근하였다.

1단계 문제인 네트워크 설계에서는 K사에서 정의하고 있는 예하관계의 최적화를 수행한다. 1단계 문제는, 서브는 단 한 개의 허브와 예하관계를 가지므로, 네트워크 설계의 전형적인 문제인 집합분할 문제(Set partitioning problem)이다. 또한, 1단계 문제의 목적함수를 예하 관계를 갖는 모든 서브와 허브의 거리 합을 최소화하도록 모델링하였다. 최적화를 수행할 때 물량의 제약으로 인하여 허브와 서브간의 거리가 먼 허브-서브 쌍이 예하관계로 맺어질 수 있다. 이를 예방하기 위해 이동 시간이 1.5시간 이상인 허브-서브 쌍은 예하관계를 가질 수 없도록 제약조건을 추가했다. 2단계 문제인 트럭운영관리에서는 간선 최적화를 진행한다. 목적함수는 간선 차량의 운송비용 및 서브 및 허브의 조업 비용을 최소화하는 것이다. 이 때, 결정 기준은 허브의 물량 처리 용량, 서브 또는 허브의 간선 연결 가능 수, 차량의 물량 제약 그리고 OD-pair 수요를 고려하였다.

3.2 일반 허브 모델 네트워크 설계 수리 모형

네트워크 설계 수리 모델에서 사용되는 집합은 다음과 같다.

- N 전체 노드(허브, 서브)의 집합
- N_H 허브들의 집합, $N_H \subset N$
- N_S 서브들의 집합, $N_S \subset N$
- A 이동 시간이 일정시간 이상인 서브-허브 노드 쌍 집합

주: 본 모형에서는 1.5시간을 기준으로 한다.

네트워크 설계 수리 모델에서 사용되는 모수는 다음과 같다.

- C_{ik} 서브 i와 허브 k 사이의 이동거리(km), $\forall i \in N_S, k \in N_H$
- NA_k 허브 k의 최대 예하 가능 수, $\forall k \in N_H$
- NR_i 서브 i의 최대 간선 수, $\forall i \in N_S$
- Q_k 허브 k의 최대 물량 처리 용량, $\forall k \in N_H$
- OD_{mn} 노드 m과 노드 n의 OD-pair 물량, $\forall m, n \in N$

네트워크 설계 수리 모델에서 사용되는 결정변수는 다음과 같다.

- x_{ik} 서브 i와 허브 k가 예하관계를 가지면 1, 그렇지 않으면 0, $\forall i \in N_S, k \in N_H$

네트워크 설계 수리 모델은 다음과 같다.

$$\text{Minimize } \sum_{i \in N_S} \sum_{k \in N_H} C_{ik} x_{ik} \quad (1)$$

st.

$$\sum_{k \in N_H} x_{ik} = 1 \quad \forall i \in N_S \quad (2)$$

$$\sum_{i \in N_S} x_{ik} \leq NA_k \quad \forall k \in N_H \quad (3)$$

$$\sum_{i \in N_S} \sum_{j \in N_S} NR_i \sum_{m \in N} OD_{im} x_{ik} \leq Q_k \quad \forall k \in N_H \quad (4)$$

$$x_{ik} = 0 \quad \forall (i, k) \in A \quad (5)$$

$$x_{ik} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in N_S, k \in N_H \quad (6)$$

수식 (1)은 예하 관계를 갖는 모든 서브와 허브의 거리 합을 최소화하기 위한 목적함수를 나타낸다. 목적함수를 이와 같이 설정한 이유는 현재 물량 상태에서, 허브 k의 최대 물량의 처리 용량을 만족하면서 실제 물량의 제약을 적용하는 2단계 문제에서 기본적인 서브-허브-허브-서브 흐름의 첫 번째 부분의 서브-허브 이동거리를 최소화함을 위함이다. 제약식 (2)는 각 서브는 하나의 허브에만 예하관계를 가질 수 있다는 것을 의미한다. 제약식 (3)은 각 허브는 자신이 가질 수 있는 예하가능 수보다 큰 개수의 서브를 예하관계로 가질 수 없음을 의미한다. 제약식 (4)는 예하관계 이외에 간선 연결이 가능하지 않은 서브의 물량의 합이 허브의 처리 물량보다 클 수 없음을 의미한다. 이때,

제약식 (4)에서 예하관계 이외에 간선 연결이 가능하지 않은 서브들만의 합을 허브의 처리 물량보다 작거나 같게 설정한다. 간선 연결이 가능한 서브의 경우 자신의 예하 허브뿐만 아니라 다른 허브와 간선 연결을 하여 물량을 이동시킬 수 있으므로 예하관계의 허브 처리 물량에는 영향을 주지 못한다. 제약식 (5)는 처리시간 제약에 따라 거리가 일정 시간 이상인 허브-서브는 예하관계를 가질 수 없음을 의미한다. 제약식 (6)은 결정변수가 이진 변수라는 것을 의미한다.

3.3 트럭 운영 관리 수리 모델

트럭 운용 관리 수리 모델은 허브와 서브간의 예하 관계가 결정된 이후, 하루 기준의 OD-pair 수요를 만족시키기 위한 트럭 운용비용을 최소화하는 것을 목적으로 한다. 구체적으로 서브 관점에서는 개별 허브로 물량을 얼마나 집결 시킬지를 결정한다. 반면 허브 관점에서는 집결된 물량을 직접적으로 목적 서브로 배송할지, 아니면 다른 허브로 물량을 보내서 재 집결 시킬지를 결정한다. 전자의 경우 트럭의 이동 비용이 감소하는 장점이 있는 반면 후자의 경우 트럭 이용비용이 감소하는 장점이 있다. 본 모형은 허브 및 간선 용량과 트럭의 용량 등을 고려하여 트럭의 운용비용을 최소화한다.

2단계 모델을 위하여 추가로 정의된 모수는 다음과 같다.

TC	트럭의 임대비용
Q^T	트럭의 물량 용량
Q_k^H	허브 k의 물량 처리 용량, $\forall k \in N_H$
C_{mn}^T	노드 m에서 노드 n으로 이동할 때의 트럭의 이동 비용, $\forall m, n \in N$
R_{mi}	노드 m에서 서브 i로 배송이 필요한 물량, $\forall m \in N, i \in N_S$
A_{ki}	허브 k가 서브 i와 예하관계이면 1, 아니면 0, $\forall k \in N_H, i \in N_S$
SC_k^H	허브 k의 조업 비용, $\forall k \in N_H$
SC^S	서브의 조업 비용
W^S	서브로 들어오는 물량

2단계 모델에서는 간선 연결, 각 허브 · 서브를 통하여 이동되는 물량을 결정변수로 설정한다. 결정변수는 다음과 같다.

x_{klm}^H	허브 k에서 허브 l로 이동하는 배송물 중 노드 m으로 배송해야 하는 물량, $\forall k, l \in N_H, m \in N$
x_{ikm}^S	서브 i에서 허브 k로 이동하는 배송물 중 노드 m으로 배송해야 하는 물량, $\forall i \in N_S, k \in N_H, m \in N$
y_{mn}	노드 m에서 노드 n으로 이동하는 차량의 수, $\forall m, n \in N$
z_{mn}	노드 m에서 노드 n으로 이동할 수 있는 간선이 존재하면 1, 아니면 0, $\forall m, n \in N$
w_k^H	허브 k로 들어오는 물량, $\forall k \in N_H$

2단계 트럭운영관리 모델의 수리 모델은 다음과 같다.

$$\text{Minimize } \sum_{m \in N} \sum_{n \in N} (C_{mn}^T + TC) y_{mn} + \sum_{k \in N_H} SC_k^H w_k^H + SC^S W^S + \sum_{k \in N_H} \sum_{m \in N} SC_k^H OD_{km} \quad (7)$$

st.

$$\sum_{m \in N} x_{ikm}^S \leq Q^T y_{ik} \quad \forall i \in N_S, k \in N_H \quad (8)$$

$$\sum_{k \in N_H} x_{ikm}^S = OD_{im} \quad \forall i \in N_S, m \in N \quad (9)$$

$$\sum_{l \in N_H} \sum_{m \in N} x_{lkm}^H + \sum_{i \in N_S} \sum_{m \in N} x_{ikm}^S \leq Q_k^H \quad \forall k \in N_H \quad (10)$$

$$z_{mn} \leq y_{mn} \quad \forall m, n \in N \quad (11)$$

$$y_{mn} \leq M z_{mn} \quad \forall m, n \in N \quad (12)$$

$$\sum_{k \in N_H} z_{ik} \leq N R_i \quad \forall i \in N_S \quad (13)$$

$$\sum_{l \in N_H | k \neq l} x_{lkk}^H + \sum_{i \in N_S} x_{ikk}^S = \sum_{m \in N | m \neq k} OD_{mk} \quad \forall k \in N_H \quad (14)$$

$$OD_{kl} + \sum_{o \in N_H} x_{okl}^H + \sum_{i \in N_S} x_{ikl}^S - \sum_{o \in N_H | o \neq l} x_{kol}^H + \sum_{m \in N | m \neq l} x_{klm}^H \leq Q^T y_{kl} \quad \forall k, l \in N_H | k \neq l \quad (15)$$

$$OD_{ki} + \sum_{l \in N_H} x_{lki}^H + \sum_{j \in N_S} x_{jki}^S - \sum_{l \in N_H} x_{kli}^H \leq Q^T y_{ki} \quad \forall k \in N_H, i \in N_S \quad (16)$$

$$OD_{kl} + \sum_{o \in N_H | o \neq k, o \neq l} x_{okl}^H + \sum_{i \in N_S} x_{ikl}^S - \sum_{o \in N_H | o \neq k, o \neq l} x_{kol}^H \leq x_{kl}^H \quad \forall k, l \in N_H | k \neq l \quad (17)$$

$$\sum_{l \in N_H} \sum_{m \in N} x_{lkm}^H + \sum_{i \in N_S} \sum_{m \in N} x_{ikm}^S \leq w_k^H \quad \forall k \in N_H \quad (18)$$

$$z_{ki} = 1 \quad \forall k \in N_H, i \in N_S | A_{ki} = 1, N R_i \geq 1, k \neq i \quad (19)$$

$$z_{ik} = 1 \quad \forall k \in N_H, i \in N_S | A_{ki} = 1, N R_i \geq 1, k \neq i \quad (20)$$

$$z_{mm} = 0 \quad \forall m \in N \quad (21)$$

$$z_{ij} = 0 \quad \forall i, j \in N_S \quad (22)$$

$$x_{kkm}^H = 0 \quad \forall k \in N_H, m \in N \quad (23)$$

$$x_{kkk}^H = 0 \quad \forall k \in N_H \quad (24)$$

$$x_{klm}^H \geq 0 \quad \forall k, l \in N_H, m \in N \quad (25)$$

$$x_{ikm}^S \geq 0 \quad \forall i \in N_S, k \in N_H, m \in N \quad (26)$$

$$y_{mn} \in \mathbb{Z}^+ \cup \{0\} \quad \forall m, n \in N \quad (27)$$

$$z_{mn} \in \{0, 1\} \quad \forall m, n \in N \quad (28)$$

$$w_k^H \geq 0 \quad \forall k \in N_H \quad (29)$$

트럭운영관리 수리 모형의 목적함수는 간선 차량의 운송비용 및 조업비용을 최소화하는 것이다. 제약식 (8)은 서브 i 에서 허브 k 로 물량을 옮기기 위해 필요한 간선 차량에 대한 제약을 의미한다. 제약식 (9)는 서브에서 허브로 이동하는 물량이 OD-pair 물량과 같음을 의미한다. 제약식 (10)은 이동되는 물량 중 허브를 거쳐가는 물량이 허브의 용량을 넘지 말아야 함을 의미한다. 제약식 (11), (12)는 간선 차량이 이동하기 위해서는 연결된 간선이 필요함을 의미한다. 이때 M 은 매우 큰 임의의 수를 의미한다. 제약식 (13)은 서브에서, 허브와의 간선 수는 간선 가능 수를 넘지 말아야 함을 나타내는 제약이다. 제약식 (14)는 허브로 배송되는 물량은 다른 허브에서 오는 물량과 예하관계에 있는 허브, 또는 간선 연결된 서브에서 오는 물량을 합친 것을 의미하는 제약이다. 제약식 (15)는 허브로 이동하는 차량의 물량은 OD-pair 물량, 다른 허브에서 받은 물량, 다른 서브에서 받은 물량에서 다른 허브로 보낸 물량, 그 외에 목적 허브로 가야 하는 물량의 합을 배송할 수 있어야 함을 나타낸다. 제약식 (16)은 허브에서 서브로 이동하는 물량은 다른 허브에서 들어오는 물량, OD-pair 물량, 다른 허브로 나간 물량, 다른 서브에서 들어오는 물량의 합을 배송할 수 있어야 함을 의미한다. 제약식 (17)은 최종 목적 허브에 도착하는 물량은 OD-pair 물량, 다른 허브에서 받은 물량, 다른 서브에서 받은 물량, 다른 허브로 보낸 물량을 합친 것과 같다는 것을 의미하는 제약이다. 제약식 (18)은 허브로 들어오는 물량이 다른 허브나 서브에서 들어오는 물량보다 작아야 함을 의미한다. 제약식 (19), (20)은 이미 예하관계를 맺고 있는 서브-허브 쌍에게 간선을 할당하는 제약이다. 제약식 (21)은 동일 노드간의 간선은 존재하지 않음을 의미하는 제약이다. 제약식 (22)는 서브-서브 쌍 사이의 간선은 존재하지 않음을 의미한다. 제약식 (23), (24)는 허브에서 자신과의 물량 이동은 없음을 의미한다. 그 외의 제약식 (25)~(29)는 변수에 대한 기본적인 제약이다.

트럭운영관리 수리 모형의 경우 문제의 복잡도가 높아서 최적 해를 합리적인 시간 내에 구하지 못하는 경우가 발생한다. 본 논문에서 고려하는 K사의 경우 전국에 100개 이상의 서브를 가지며, 10개 이내의 허브를 가지고 있다. 이러한 현실 크기의 문제의 해를 구하려면 24시간 이상의 시간이 필요한 경우가 대부분이며, K사의 경우도 24시간 내에 해결이 불가능하였다. 트럭운영관리 수리 모형의 경우 하루 기준의 물량에 대한 해를 도출하기 때문에 합리적인 시간 내에 가능 해를 도출하는 것이 중요한 이슈이다. 따라서, 본 연구에서는 LP 완화 방법을 사용하여 정수로 제약된 변수를 실수로 바꾸어 해를 구한 뒤 특정 변수의 해를 고정시켜서 문제 복잡도를 낮추었다. 해당 수리 모형에서 간선 가능 결정변수인 z_{mn} 을 변수 고정 방법을 통해 0에서 1사이의 실수 해가 나온 경우 그 중 가장 값을 제약식 (13)을 만족하면서 값을 1로 고정하여 순차적으로 고정 변수를 사용하여 문제를 해결하였다. 또한 이동하는 트럭의 수를 결정하는 결정변수 y_{mn} 은 실수해를 구한 뒤, 0.3대를 기준으로 최종 목적값 계산을 위한 목적함수 계산시 정수로 올림 계산 하였다. 0.3대의 기준은 현업에서 사용하는 데

이터와 운송비용 데이터를 기준으로 트럭에 적재된 화물이 0.3대를 초과하지 않는 한 트럭의 여유 공간을 활용할 수 있다는 가정하에 가장 근사한 올림 기준을 산출하였다.

4. 메가 허브 모델 네트워크

4.1 메가 허브 모델 네트워크 문제 정의

메가 허브 모델은 다수의 소규모의 허브를 통합하여 소수의 용량이 매우 큰 허브를 운영하는 방법을 의미한다. 소수의 허브를 운영함으로써 복잡한 네트워크 구조를 단순하게 만들어 용이한 운영이 가능하게 할 수 있다는 장점이 존재한다. 본 논문의 메가 허브 모델은 물량이 많은 수도권을 위한 2개의 메가 허브, 수도권 이외의 지방 물량을 담당하는 전국 메가 허브 1개를 가정한다. 이는 현재 10개 이내로 존재하는 허브를 총 3개의 허브로 줄인 것이다. 메가 허브 모델에서 물량은 반드시 서브에서 출발한 물량이 하나의 허브를 거쳐 다른 서브로 배송되는 것을 기본 가정으로 한다. 지방 서브의 물량은 반드시 메가 허브를 거쳐 다른 서브로 배송된다. 또한, 수도권 내의 물량은 메가 허브 또는 2개의 수도권 허브 중 하나를 거쳐서 다른 서브로 배송된다. 이 경우, 보내는 물량이 충분하지 않을 때 지방에서 수도권으로 보내는 물량과 함께 메가 허브에서 집하한 후 수도권으로 배송하는 것을 가정하였다. 수도권 내의 물량 중 보내는 물량이 충분할 경우에는 수도권 내의 간선 차량으로 집하여 수도권 허브를 거쳐 배송된다. 반면 수도권 내에서 물량이 충분하지 않을 경우에는 지방에서 집하 또는 배송되는 간선 차량과 함께 메가 허브에서 모인 후 수도권으로 배송된다.

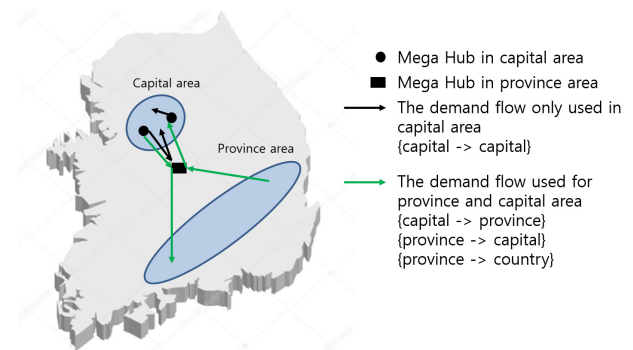


Figure 2. Mega Hub Network

4.2 메가 허브 모델 네트워크 수리 모형

제 3.2절의 일반 허브 모델 네트워크 설계 수리 모형에 이어, 메가 허브 모델에서 추가로 정의된 집합은 다음과 같다.

S_S	수도권 서브들의 집합, $S_S \subset N_S$
S_M	비수도권 서브들의 집합, $S_M \subset N_S$
H_D	전국 메가 허브, $ H_D = 1$

메가 허브 모델에서 사용되는 결정변수는 다음과 같다.

- x_{ikj} 서브 i 에서 허브 k 를 거쳐 서브 j 로 가는 배송물의 양,
 $\forall i, j \in N_S, k \in N_H$
- y_{ik}^a 서브 i 에서 허브 k 로 이동하는 간선차량의 수,
 $\forall i \in N_S, k \in N_H$
- y_{kj}^b 허브 k 에서 서브 j 로 이동하는 간선차량의 수,
 $\forall k \in N_H, j \in N_S$
- z_{ik}^a 서브 i 에서 허브 k 로의 간선 연결 여부,
 $\forall i \in N_S, k \in N_H$
- z_{kj}^b 허브 k 에서 서브 j 로의 간선 연결 여부,
 $\forall k \in N_H, j \in N_S$

메가 허브 모델의 수리 모델은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Minimize } & \sum_{i \in N_S} \sum_{k \in N_H} (C_{ik}^T + TC) y_{ik}^a \\ & + \sum_{k \in N_H} \sum_{j \in N_S} (C_{kj}^T + TC) y_{kj}^b + \sum_{i \in N_S} \sum_{j \in N_S} \sum_{k \in N_H} SC_k^H x_{ikj} \end{aligned} \quad (30)$$

st.

$$\sum_{k \in N_H} x_{ikj} = OD_{ij} \quad \forall i, j \in S_S \quad (31)$$

$$\begin{aligned} x_{iK_Dj} &= OD_{ij} & \forall i, j \in S_M \text{ or } \\ & & \forall i \in S_S, \forall j \in S_M \text{ or } \\ & & \forall i \in S_M, \forall j \in S_S \\ & & \forall k \in H_D \end{aligned} \quad (32)$$

$$\sum_{i \in N_S} x_{ikj} \leq Q^T y_{kj}^b \quad \forall j \in N_S, k \in N_H \quad (33)$$

$$\sum_{i \in N_S} x_{ikj} \leq Q^T y_{ik}^a \quad \forall i \in N_S, k \in N_H \quad (34)$$

$$\sum_{i \in N_S} \sum_{j \in N_S} x_{ikj} \leq Q_k^H \quad \forall k \in N_H \quad (35)$$

$$z_{ik}^a \leq y_{ik}^a \leq M z_{ik}^a \quad \forall i \in N_S, k \in N_H \quad (36)$$

$$z_{kj}^b \leq y_{kj}^b \leq M z_{kj}^b \quad \forall k \in N_H, j \in N_S \quad (37)$$

$$\sum_{k \in N_H} z_{ik}^a \leq NR_i \quad \forall i \in N_S \quad (38)$$

$$\sum_{k \in N_H} z_{kj}^b \leq NR_j \quad \forall j \in N_S \quad (39)$$

$$x_{ikj} \geq 0 \quad \forall i, j \in N_S, k \in N_H \quad (40)$$

$$y_{ik}^a \geq 0, y_{kj}^b \geq 0, y_{ik}^a, y_{kj}^b \in Z \quad \forall i, j \in N_S, k \in N_H \quad (41)$$

$$z_{ik}^a, z_{kj}^b \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in N_S, k \in N_H \quad (42)$$

메가 허브 모델에서는 간선 차량의 운송비용 및 터미널의 조업비용을 최소화하는 것을 목적함수로 한다. 제약식 (31)은 수도권에서 수도권으로 이동하는 물량은 수도권의 허브 2개, 메가 허브를 경유할 수 있음을 나타내는 제약이다. 제약식 (32)는 수도권 → 지방, 지방 → 수도권, 지방 → 지방의 형태로 이동해야 하는 물량은 메가 허브만 경유함을 나타낸다. 제약식

(33), (34)는 간선 차량의 이동시킬 수 있는 물량 제약을 의미한다. 제약식 (35)에서, 허브 k 로 모이는 물량은 해당 허브의 처리 물량 용량을 넘지 말아야 한다. 제약식 (36), (37)은 터미널 간 간선 차량이 이동하기 위해 간선을 연결시켜주는 제약이다. 제약식 (38), (39)는 연결할 수 있는 간선에 대한 제약을 의미한다. 제약식 (40), (41), (42)는 기본적인 비음조건 및 이진 변수 제약이다.

메가 허브 모델의 경우 문제의 복잡도가 낮아 최적 해를 합리적인 시간 내에 구할 수 있었다. 특히 현실 크기의 문제의 해를 구하는데 있어서 1분 안팎의 시간이 필요하였으며, 본 논문에서 고려하는 K사의 경우 1분을 넘기지 않고 해를 구하였다.

5. 수리모형 실험 설계 및 결과 분석

5.1 모수 산정

목적함수의 비용은 운송비용, 조업비용으로 구성되어 있으며, 운송비용은 간선 차량임대비용과 간선 차량 이동비용으로, 조업비용은 물량대비 스캔 비용의 곱으로 산출하였다. 실험에 사용된 구체적인 비용과 계수는 다음과 같이 계산하였다.

- 운송비용 : 변동비(변동 계수×거리 조정 값×간선 차량대수)+고정비(고정계수×간선 차량대수) 고정 계수(간선 차량 임대비용): 92,000원, 변동 계수(간선 차량 이동비용): 300원/1km 해당 비용은 현업에서 사용되는 km당 이동 거리를 바탕으로 실제 비용과 가장 근사한 수치로 산출하였다.
- 조업비용 : 각 터미널별 스캔단가×처리물량, 서브 : 터미널별 평균 스캔단가(56.8원)×처리물량×0.75 서브의 터미널별 평균 스캔 단가는 현업에서 사용하는 비용을 기준으로 산출하였으며 0.75 값은 터미널별 스캔 물량이 달라 생기는 오차를 조정하기 위한 값이다. 해당 값은 실측 데이터를 기준으로 가장 근사한 비율 값을 산출하였고 총 서브 별 스캔 단가 비용의 평균값으로 서브 별 스캔 단가를 통일하였다.
- 허브 : 터미널별 스캔단가×처리물량×1.5, 허브의 터미널별 스캔 단가는 현업에서 사용하는 비용을 기준으로 산출하였으며 1.5 값은 터미널별 스캔 수가 달라 생기는 오차를 조정하기 위한 값이다. 해당 값은 실측 데이터를 기준으로 가장 근사한 비율 값을 산출하였다.

거리조정 값(km)은 실제 간선 차량이 움직인 거리를 나타내는 비용으로 K사에서 제공한 노드별 위도 경도 데이터를 이용하였다. 위도 경도 데이터를 구글 지도(<https://cloud.google.com/maps-platform>)에 적용하여 직선거리를 구한 뒤, 네이버 지도 길 찾기(<https://map.naver.com>)를 사용하여 특정 거리 별 구간 데이터를 구하였다. 특정 거리 별 구간 데이터와 위도 경도를 이용한 직선거리의 차이를 분석해서 직선거리로 실제 거리를 추정해 줄 수 있는 계수를 산출하였다. 그 뒤 같은 구간 내에 다른 직선거리에도 계수를 적용하여 보정된 직선거리 데이터를

최종적으로 사용하였다.

롤테이너를 이용하는 화물(R/T 물량)은 일반 화물과는 다르게 출발 서브에서 롤테이너로 만들어진다. 이때 롤테이너는 하나의 박스 당 약 40개의 물량으로 꾸러지며, 간선 차량에는 최대 30개의 박스가 들어갈 수 있다고 가정하였다. R/T 물량 처리비용은 현업에서 평균적으로 사용되는 비율인 일반 박스 물량 처리비용의 1/10로 산출하였다.

5.2 현재 처리물량에 대한 실험 및 결과

1단계 문제를 통해 허브의 물량 한계와 간선 수의 한계를 고려하여 최소의 거리를 유지할 수 있는 서브-허브 관계를 설정하였다. 모든 서브는 개별로 하나의 허브에만 할당되어야 하며, 이때의 비용은 이동 거리(단위 km)에 따른 비용으로 계산하였다. 실험에 사용된 허브의 처리 가능 용량은 K사에서 제공한 데이터를 바탕으로 적용하였다.

1단계 문제에서 구한 해가 현재 K사의 서브-허브 예하 관계와 비교하여 얼마나 좋은 해를 구했는지 평가하기 위해 K사에서 현재 사용하고 있는 서브-허브 예하 관계를 이용한 1단계 목적 값을 추가적으로 구하였다. 참고로 현재 K사에서 사용하고 있는 서브-허브 예하 관계 중 K사에서 제공해준 데이터간의 모순이 존재하는 경우에는 모순된 서브-허브 예하 관계를 제거하였다. 구체적으로 정리한 K사의 현재 서브-허브 예하관계와 1단계 문제를 통해 개선된 서브-허브 예하관계의 차이는 다음과 같다.

K사에서 사용하는 현재 예하관계를 바탕으로 계산한 비용과 본 연구에서 제시한 일반 허브 모델의 1단계 문제를 통해 계산한 비용을 비교한 결과 총 4.98%의 이동 거리 개선이 이뤄짐을 확인하였다. 현재의 방식과 개선된 예하 관계를 살펴보면, 전체 130개 대비 102개의 서브-허브 예하 관계가 일치하는 것을 보였다. 즉, 새롭게 개선된 서브-허브 예하 관계는 28개이고, 이러한 개선 사항이 4.98%의 이동 거리 개선 효과를 가져온 것을 알 수 있었다. 개선되는 정도가 비교적 적기 때문에 현실적인 제약을 고려하였을 때, 현재 K사의 예하 관계 운용은 잘 되고 있는 것을 파악할 수 있었다.

일반 허브 모델의 2단계 문제는 서브-허브 예하 관계가 정해진 이후, 이러한 정보를 사용해서 구체적으로 간선 할당과 간선 차량의 운용에 대해 구체적인 해를 구하는 것을 목적으로 하였다. 2단계 문제의 특징 중 하나는 미리 정의된 서브-허브 예하 관계에 따라 해가 달라질 수 있다는 것이다. 그렇기 때문에 1단계에서 구한 예하 관계를 사용할 때와 K사에서 현재 사용하고 있는 예하 관계를 사용할 때의 해의 차이가 존재하였다. 단순히 2단계 문제를 풀어서 나온 해를 비교하면 1단계 문제를 풀어서 나온 해의 영향이 전체 해의 개선 효과에 영향을 미치게 되는 것을 알 수 있었다. 이러한 상황을 다루기 위해 일반 허브 모델에 대해 총 3가지 다른 실험을 진행하였다.

K사의 예하 관계와 K사의 현재 간선을 유지하는 A 모델, K

사의 예하 관계와 2단계 문제를 풀어서 구한 최적 간선을 적용하는 B 모델, 1단계 문제를 풀어서 구한 예하 관계와 2단계 문제를 풀어서 구한 최적 간선을 적용하는 C 모델, 메가 허브 모델을 사용하는 실험으로 총 4개의 모델에 대해서 실험을 진행하였다. 모든 모수는 일반 허브 모델과 메가 허브 모델에 동일하게 적용되었으며, 간선제약은 메가 허브 모델의 경우 의미가 없어 제외하였다. 정리한 실험 결과는 다음과 같으며, A 모델에서 도출된 전체 최적 비용을 100 이라는 기준으로 설정하고, A 모델의 전체 최적 비용 대비 다른 모델들의 비용 비율을 계산하였다.

메가 허브 모델은 3개의 수도권 1, 수도권 2, 메가 허브만 운영을 한 채, 모든 물량을 한 번의 허브만 경유한다는 가정하에 최적의 간선 차량 운용 및 물량 할당에 대해 구체적인 해를 구하는 것을 목적으로 하였다. 메가 허브 모델은 서브-허브 예하 관계를 새로운 허브 운용 모델에 맞추어 할당하기 때문에 K사의 현재 사용하고 있는 서브-허브 예하 관계나 1단계 문제를 풀어서 구한 서브-허브 예하 관계를 사용하지 않았다. 본 연구에서 제시된 모델은 Xpress-MP 7.9를 사용하여 코드를 구현하고 해를 구하였다.

Table 1. Difference between Hub-and-Spoke and Mega-Hub Models (unit : %)

	Hub-and-Spoke			Mega-Hub
	A	B	C	
Total costs	100.00	98.56	98.16	92.07
Operation costs	48.28	48.09	48.05	41.98
Transportation costs	51.72	50.48	50.10	50.09

위의 비용 산출표 <Table 1>을 확인해보면, 일반 허브 모델과 비교하여 메가 허브 모델의 전체 비용이 크게 절감되는 것을 확인할 수 있었다. 메가 허브 모델의 비용 개선을 비용 요소별로 살펴보면, 대부분의 비용은 조업비용 부분에서 크게 절감되는 것을 확인할 수 있었다. 반면 운송비용의 경우 일반 허브 B, C 모델과 비교해서 차이가 거의 없는 것을 확인할 수 있었다.

조업비용이 절감되는 이유는 2가지 이유로 해석할 수 있다. 첫째는, 기존의 일반 허브 모델을 사용할 경우 물량이 이동할 때 중간에 경유하는 허브가 많기 때문에 허브와 관련된 조업 비용이 많이 발생한다. 반면 메가 허브 모델을 사용할 경우 하나의 허브를 경유해서 전체 조업비용이 발생하는 과정이 줄어든다. 메가 허브 모델을 사용할 경우 기존의 일반 허브 모델에서 사용되는 5개의 허브가 서브로 역할이 바뀌게 된다. 허브에서 진행되는 작업에 비해 서브에서 진행되는 작업의 조업 비용이 더 적게 들기 때문에 전체 조업비용이 감소하게 된다.

운송비용의 경우 기존의 방식과는 큰 차이가 없는데, 이는 다양한 허브가 존재하여 이동 거리를 단축했던 기존의 일반 허브 모델과는 달리 3가지 허브 중(수도권 2, 메가, 수도권 1)

하나를 선택해야 하는 메가 허브 모델이 총 이동 거리를 증가하게 만드는 경우를 확인하였다. 동시에 메가 허브 모델은 3개의 허브로 물량을 집중하여 물량 집약으로 인한 간선 차량의 운용비용 감소 효과를 확인하였다. 이러한 Trade-Off로 인해 전체 운송비용에서 일반 허브 모델과 메가 허브 모델의 차이가 적게 발생하였다.

5.3 중/장기 시나리오 실험 및 결과

중/장기 계획은 향후 전체 처리 물량이 증가할 때를 고려하여 K사 택배의 물류 처리 비용을 파악함과 동시에 미래에 확장될 허브의 용량에 대한 분석을 하는 것을 목적으로 하였다. 이때 미래 물량은 회귀분석을 이용한 수요 예측 결과를 바탕으로 전체 물량이 150만일 때, 180만일 때, 200만일 때로 구분하여 구하였다.

중/장기 계획을 위한 첫 번째 시나리오로 지리상 중심에 위치한 메가 허브를 확장할 경우(Mega Hub 시나리오) 전체 처리 가능한 물량을 113만 박스로 가정하였다. 해당 수치는 K사가 확보한 Mega Hub 부지와 장비의 활용률을 최대로 가정했을 때 처리 가능한 물량이다. 두 번째 시나리오로 수도권 1 허브를 확장할 경우(Seoul 1 Hub 시나리오) 전체 처리 가능한 물량을 40만 박스로 가정하였다. 마지막 세 번째 시나리오로 3개 허브를 운용하는 경우(3 Hubs 시나리오)는 수도권 1, 수도권 2, 메가 허브만 사용한다고 가정하며, 메가 허브의 처리 가능 물량은 113만 박스, 수도권 1 허브의 처리 가능 물량을 40만 박스, 수도권 2 허브의 처리 가능 물량을 41만 박스로 가정하였다. Mega Hub 시나리오와 마찬가지로, 허브의 처리 가능 물량은 K사가 확보한 부지와 장비의 최대 활용률을 바탕으로 선정하였다.

본 논문에서는, K사 택배에서 사용하고 있는 현재의 예하 관계를 사용하면 증가하는 물량에 대한 정보를 반영하지 못하였다. 따라서 증가하는 물량에 대해 새로운 예하 관계를 구한 뒤, 이것을 반영해서 전체 비용을 산출하였다. 이전 실험과 마찬가지로 수리 모델이 현장의 모든 사항을 반영할 수 없기에 일부 값은 보정을 통해 반영하였다. 현재 허브의 처리 가능 물량 한계가 과소평가가 되어있기 때문에 증가하는 물량에 대해서 가능한 해를 구할 수 없어 이를 보완하기 위해 허브 별 1만 박스의 추가 물량 처리가 가능한 상황을 고려하였다.

메가 허브 확장 후 발생하는 전체 비용을 100이라는 기준으로 표현하고, 수도권 1 허브 확장, 3개 허브만 운용하는 방식의 시나리오에서 발생하는 비용을 기준점 대비 상대적인 수치로 비교하여 정리하였다. 참고로 수도권 1 허브의 경우 앞에서 가정한 40만 박스의 처리 가능 물량이 되도록 허브를 확장해도 물량이 150만 개의 상황에서 전체 물량을 처리할 수 없는 것을 파악하였다. 하지만 수도권 1 허브의 지리적 장점을 파악해보기 위해 추가 확장 가능한 용량이 매우 크다고 가정하여 다른 대안들과 비교하였다. 물량이 150, 180, 200만 박스인 상황의 대안 별 비용은 다음 표와 같다.

Table 2. Experiments Results with the 1,500,000 Boxes Scenario
(unit : %)

	1,500,000 boxes		
	Mega Hub	Seoul 1 Hub	3 Hubs
Total costs	100.00	100.57	100.18
Operation costs	48.03	47.86	47.15
Transportation costs	51.97	52.71	53.03

Table 3. Experiments Results with the 1,800,000 Boxes Scenario
(unit : %)

	1,800,000 boxes		
	Mega Hub	Seoul 1 Hub	3 Hubs
Total costs	100.00	99.92	99.41
Operation costs	48.01	47.89	47.00
Transportation costs	51.99	52.03	52.40

Table 4. Experiments Results with the 2,000,000 Boxes Scenario
(unit : %)

	2,000,000 Boxes		
	Mega Hub	Seoul 1 Hub	3 Hubs
Total costs	100.00	98.96	99.03
Operation costs	48.32	47.54	47.08
Transportation costs	51.68	51.42	51.95

실험 결과 메가 허브만을 확장하는 것은 물량이 150만 개 수준으로 증가할 때는 비용이 적게 드나, 장기적인 관점에서 180만 개 또는 200만 개로 증가하는 경우 다른 두 대안보다 비용이 많이 드는 것을 파악할 수 있었다. 수도권 1 허브를 확장하는 것과 3개 허브만 운용하는 것에는 서로의 장점과 단점이 존재했다. 3개 허브만을 운용할 경우에는 조업비가 크게 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 반면 수도권 1 허브를 확장하는 경우에는 물량이 증가할수록 운송비용이 절감되는 것을 확인할 수 있었다.

메가 허브를 확장하는 대안과 수도권 1 허브를 확장하는 대안을 비교할 경우, 현실적으로 미래 운용 가능한 대안을 생각한다면 메가 허브를 확장하는 대안이 적합한 것을 확인하였다. 수도권 1 허브를 확장하는 대안의 경우 물량이 150만 박스만 되어도 전체 물량을 처리할 수 없어 가까운 미래에 추가 시설의 증설이 요구되었다. 하지만 수도권 1 허브를 메가 허브가 확장 가능한 만큼 확장할 수 있다고 가정하는 경우에, 하루 처리 물량이 180만 박스 이상일 경우에는 수도권 1 허브를 확장하는 것이 좋은 대안이 될 수 있었다.

미래 수요를 예측했을 때, 수도권 물량이 크게 증가하는 것을 알 수 있었다. 그렇기 때문에 수도권과 상대적으로 가까운 수도권 1 허브를 확장하는 것이 장기적인 이득을 가져올 수 있는 것으로 파악된다. 정리하자면 현실적인 대안으로는 메가 허브를 확장하는 것이 수도권 1 허브를 확장하는 것보다 경쟁력 있는 대안임을 알 수 있었다. 그러나 장기적인 관점에서 수도권 물량이 증가하는 것

을 고려한다면 수도권과 가까운 허브의 증설이 보다 많은 비용을 절감할 수 있었다. 기본적으로 3개의 허브만 사용할 때 다른 대안에 비해 비용이 적은 이유도 위와 유사한 것으로 파악된다.

6. 결 론

모바일을 포함한 온라인시장의 성장과 B2C 물량의 급증으로 인한 택배시장 규모는 지속적으로 확대될 전망이다. 이에 반해 택배시장의 과열로 평균단가가 지속적으로 하락하고, 점유율의 정체 또는 감소로 인해 규모의 경제 혜택을 누리지 못하는 대부분의 택배업체의 수익성은 지속적으로 악화되고 있는 실정이다. 본 연구에서는 택배업체의 경쟁력 제고 방안의 일환으로 기존 물류거점의 입지, 용량, 네트워크 구조 등 물류거점화 의사결정을 위한 경영과학방법론을 제안하고, 향후 택배 수요 변화에 따라 운영 효율을 극대화하기 위한 택배 네트워크 최적화 전략을 도출하기 위한 수리적 모형을 개발하였다. 택배 네트워크 최적화 모형을 일반 허브 모델 네트워크 구조와 메가 허브 모델 네트워크 구조로 분류하여 K 기업에 맞춤형 최적화 모형을 각각 구축하였다.

일반 허브 모델 네트워크 구조에 대해서는 1단계 네트워크 설계를 위한 집합분할 문제를 적용하여 최적 예하 관계 구축하였다. 2단계 물량 배송관리를 위해 수리적 모형을 구축하여 간선 최적화 해를 도출하였다. 개발된 일반 허브 모델과 메가 허브 모델 네트워크 구조에 대한 최적화 모형을 K 기업의 현행 운영 자료를 기반으로 하여 최적화 모형을 수행하여 현재의 운영 상황과 비교하여 수행 결과 비교 검증하였다. 중장기적으로 추정된 택배물동량을 기준으로 생성된 O/D 물동량을 기준으로 개발된 일반 허브 모델과 메가 허브 모델 네트워크 구조에 대한 최적화 모형을 실행하여 각 모형을 비교 분석하였고, 이 때 주요 허브의 용량 확장에 따른 비용 분석을 수행하였다. 분석 결과 메가 허브 모델 네트워크 구조가 단기 및 장기적 관점에서 우수한 것을 알 수 있었다.

본 연구는 하루 동안 발생하는 O/D 물동량을 기준으로 거시적이고 장기적인 관점의 운용 방법을 제안한다. 그렇기 때문에 장기적인 시설 투자나 간선 변경 등의 전반적인 비용 차이를 분석하기에는 용이하지만, 하루 단위의 차량 스케줄링 관점에서는 한계가 있다. 특히 단기적인 관점에서는 차량이 허브나 서브에 도착하는 시간이 중요한데, 본 연구에서 제안하는 모델들은 시간에 대한 고려를 하지 않았다. 따라서 앞으로는 시간을 고려한 시물레이션이나 운영 레벨을 반영할 수 있는 새로운 수리 모델에 대한 연구 방향을 재고할 필요가 있다.

참고문헌

- Cheung, W., Leung, L. C., and Wong, Y. M. (2001), Strategic service network design for DHL, Hong Kong, *Interfaces*, **31**(4), 1-14.
- Choi, K. H. (2011), System Thinking for Increasing the Operational Efficiency of Door-to-door Delivery Network, *Korean System Dynamics Review*, **12**(1), 89-114.
- Chung, K. H. and Ko, C. S. (2002), Allocation problem in door to door delivery service network, In Proceeding of 2002 KIIE/KORMS Spring Joint Conference.
- Chung, K. H., Ko, H. J., and Ko, C. S. (2011), Compromised Network Design Model for the Strategic Alliance of Service Centers and Consolidation Terminals in Express Courier Services, *Journal of Korean Institute of Industrial Engineers*, **37**(4), 304-310.
- Daskin, M. S. (2013), Network and Discrete Location : Models, Algorithms and Applications, Wiley Press, New York.
- Kim, K. H., Ko, C. S., and Shin, J. Y. (1998), A Review Study on Quantitative Models for Freight Transportation Planning and Operation, *IE Interfaces*, **11**(1), 1-14.
- Kim, W. J., Doh, S. Y., and Park, S. D. (2001), Overnight Linehaul Scheduling with Small Amount Shipment using Genetic Algorithm, *Korea Logistics Society*, **9**(2), 104-120.
- Kim, W. J., Lim, S. M., and Park, S. D. (2000), Truck scheduling for linehaul operations with small amount of shipment, *IE Interfaces*, **13**(3), 471-478.
- Korea Integrated Logistics Association (2017), Revenue and Volume trend in the national courier market in 2016, <http://cn.moneta.co.kr/Service/paxnet/ShellView.asp?LinkID=27&NewsSetID=4820&ModuleID=1831&ArticleID=2017011711040401171&Title=콰이낸설뉴스&stockcode=&codeName=>
- Lee, G. S. and Gang, S. P. (1990), Establishment and Application of Mathematical Planning Model for allocation of Complex Cargo Terminal Site, *Korea Society of Transportation*, **8**(1), 41-54.
- Lee, H. J., Ko, C. S., and Kim, B. N. (2010), A hybrid optimization/simulation approach for reconfiguration of express courier service network, *International Journal of Logistics and SCM Systems*, **10**(1), 81-92.
- Lee, H. S., Shin, K. S., and Kim, Y. K. (2005), A Design of Capacitated Hub-and-Spoke Networks with Direct Shipment : Evolutionary Algorithm based Approach, *Journal of Korean Institute of Industrial Engineers*, **31**(4), 303-315.
- Lee, J. H. and Moon, I. K. (2014), A hybrid hub-and-spoke postal logistics network with realistic restrictions : a case study of Korea Post, *Expert Systems with Applications*, **41**, 5509-5519.
- Leung, L., Magnanti, T., and Singhal, V. (1990), Routing in point-to-point delivery systems : formulations and solution heuristics, *Transportation Science*, **24**(4), 245-260.
- Lim, H. and Shioda, N. (2011), The impact of online shopping demand on physical distribution networks : a simulation approach, *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, **41**(8), 732-749.
- Lim, H., Lim, J. W., and Lee, H. (2007), Exploratory study on the efficient operation of parcel delivery network with the growth of online shopping industries, *Korean Journal of Marketing*, **9**(2), 97-129.
- Lumsden, K., Dallari, F., and Ruggeri, R. (1999), Improving the efficiency of the Hub and Spoke system for the European distribution network, *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, **29**(1), 50-66.
- Min, H. (1994), Location analysis of international consolidation terminals using the analytic hierarchy process, *Journal of Business Logistics*, **15**(2), 25-44.

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

Schneider, J. B. Symons, J. G., and Goldman, M., Planning transportation terminal systems in urban regions, *Transportation Research*, 6(3), 257-273.

저자소개

김성우 : 고려대학교 산업경영공학과에서 2016년 학사, 서울대학교 산업공학과에서 2018년 석사학위를 취득하고 미국 Georgia Institute of Technology에서 산업공학과 박사과정에 재학 중이다. 연구분야는 생산관리 및 온라인 알고리즘이다.

권영준 : 서울대학교 산업공학과에서 2016년 학사학위를 취득하고 서울대학교 산업공학과 박사과정에 재학 중이다. 연구분야는 재고관리 및 SCM이다.

최서현 : 서울대학교 산업공학과에서 2016년 학사, 2018년 석사학위를 취득하였다. SK Hynix DRAM개발사업부에 재직 중이다.

이준섭 : 연세대학교 산업공학과에서 2017년 학사를 취득하고 연세대학교 산업공학과 박사과정에 재학 중이다. 연구분야는 최적화 및 머신러닝이다.

고승윤 : 고려대학교 산업경영공학과에서 2012년 학사, 2019년 박사학위를 취득하였다. 연구분야는 물류관리 및 SCM이다.

정병도 : 연세대학교 산업시스템공학과에서 1998년 학사, 2001년 산업공학 석사를 취득하였으며, 2010년 펜실베이니아 주립대 산업공학과에서 박사학위를 취득하였다. 2013년부터 성균관대학교 시스템경영공학과 교수로 재직하였고, 2016년부터 연세대학교 산업공학과 교수로 재직하고 있다. 연구분야는 SCM 및 강건최적화이다.

문일경 : 서울대학교 산업공학과에서 1984년 학사, 1986년 석사, 미국 Columbia University 산업공학과에서 1991년 박사학위를 취득하였으며 1998년 공장관리기술사 자격을 취득하였다. 1991년부터 1992년까지 싱가포르국립대학교 경영대학 조교수, 1992년부터 2012년까지 부산대학교 산업공학과 교수, 2006년부터 2008년까지 대한산업공학회 편집위원장 및 2011년부터 2012년까지 저널 부회장을 역임하였다. 2012년부터 서울대학교 산업공학과 교수로 재직 중이며 2019년부터 제 23대 대한산업공학회장을 역임하고 있다. 연구분야는 생산관리 및 SCM이다.

고창성 : 서울대학교 산업공학과에서 1983년 학사, KAIST에서 1985년 산업공학 석사, 1990년 박사학위를 취득하였으며, 1988년부터 경성대학교 산업경영공학과 교수로 재직하고 있다. 연구분야는 물류관리 및 SCM이다.