

# 수송 규모의 경제 효과를 고려한 단일 할당 허브 네트워크 설계 모형의 개발

## Development of a Single Allocation Hub Network Design Model with Transportation Economies of Scale

김동규\* · 박창호\*\* · 이진수\*\*\*

Kim, Dong Kyu · Park, Chang Ho · Lee, Jin-Su

### Abstract

Transportation Economies of scale are the essential properties of hub networks. One critical property of the hub network design problem is to quantify cost savings which stem from economies of scale, the costs of operating hub facilities and opportunity costs associated with delays stemming from consolidation of traffic flows. Due to the NP-complete property of the hub location problem, however, most previous researchers have focused on the development of heuristic algorithms for approximate solutions. The purpose of this paper is to develop a hub network design model considering transportation economies of scale from the consolidation of traffic flows. The model is designed to consider the uniqueness of hub networks and to determine several cost components. The heuristic algorithms for the developed model are suggested and the results of the model are compared with recently published studies using real data. Results of the analysis show that the proposed model reflects transportation economies of scale due to consolidation of flows. This study can form not only the theoretical basis of an effective and rational hub network design but contribute to the assessment of existing and planned logistics systems.

**Keywords :** *hub network design model, consolidation of flows, transportation economies of scale*

### 요 지

수송 규모의 경제 효과는 허브 네트워크의 특수한 현상이다. 허브 네트워크의 중요한 특성은 규모의 경제 효과로 인한 비용 절감과 허브 시설 운영 및 수송량 집화에 따른 지체와 관련한 비용들을 정량화하는 것이다. 그럼에도 불구하고 허브 입지 문제의 NP-complete 특성으로 인하여, 대부분의 기존 연구자들은 근사해 도출을 위한 휴리스틱 알고리즘 개발에 초점을 맞추었다. 본 연구의 목적은 규모의 경제 효과를 반영하는 허브 네트워크 설계 모형을 개발하는 것이다. 모형은 허브 네트워크의 특수성을 고려하고 다양한 비용요소들을 결정할 수 있도록 설계된다. 개발된 모형식을 반영하는 휴리스틱 알고리즘이 개발되며 모형의 결과들은 실제 데이터를 이용하여 최근 발표된 연구결과들과 비교된다. 분석 결과, 제안된 모형은 수송량 집화에 따른 규모의 경제 효과를 잘 반영할 수 있는 것으로 확인되었다. 본 연구는 효율적이고 합리적인 네트워크 설계의 이론적 기반을 구성함과 동시에 현재 및 계획 중인 물류시스템의 평가에도 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

**핵심용어 :** 허브 네트워크 설계 모형, 수송량 집화, 수송 규모의 경제

## 1. 서 론

### 1.1 연구의 배경 및 필요성

거점 간의 고속 대용량 화물 운송과 거점 중심의 부가가치 활동을 수행하는 범세계적 허브 네트워크 시스템이 지역별 물류 거점을 기반으로 광범하게 구축되고 있다. 이는 시장 경제의 세계화, 통합화에도 기인하지만 근본적으로는 항공 노선 및 배송 네트워크 등의 물류 산업과 광전송 및 가입자 망 등의 정보통신 산업에서 경험적으로 입증된 허브

네트워크의 효율성에서 그 원인을 찾을 수 있다.

허브 네트워크의 효율성은 수송 규모의 경제에서 비롯된다. 비허브 노드에서 출발한 수송량들은 허브에 도착한 후 재그룹화되며, 허브 시설을 출발하여 다른 허브 및 최종 목적지로 이동한다. 따라서 같은 곳에서 출발하여 다른 곳으로 이동하는 수송량들은 허브로 들어가는 경로에서 집화되며, 같은 목적지를 가진 수송량들은 허브 시설에서 함께 빠져나온다. 그럼에도 불구하고 허브 네트워크에서 발생하는 수송 규모의 경제 효과에 대한 이론적, 분석적인 접근들은 지금까지

\*정회원 · 교신저자 · Dept. of Urban and Regional Planning, University of Illinois at Urbana-Champaign, 객원 연구조교수 (E-mail: trafkd@gmail.com)

\*\*정회원 · 서울대학교 공과대학 지구환경시스템 공학부 교수 (E-mail: parkch@snu.ac.kr)

\*\*\*서울대학교 공과대학 지구환경시스템 공학부 박사과정 (E-mail: jslee77@gmail.com)

지 거의 수행된 바 없었다.

허브 네트워크 시스템의 효율화에 관한 연구는 다기준점 네트워크의 수송비용을 최소화하는 허브의 최적 입지(location)와 비허브 노드의 허브 노드 할당(allocation) 및 기준점 별 최적 수송 경로 배정(assignment)을 결정하는 네트워크 설계 문제로써 현실적인 규모의 네트워크에 대한 정확해를 합리적인 시간 내에 도출하는 것이 불가능한 NP-complete 문제로 알려져 있다. 따라서 대부분의 기존 연구들은 목적함수를 단순한 형태로 구성하고 근사 최적해를 도출하는 휴리스틱 해법에 초점을 맞추어 진행되었다. 본 연구와 관련된 기존 연구들은 표 1에 제시되어 있다.

허브 입지 모형에 관한 기존 연구들이 수학적 접근법에 기초한 효율적인 해법 개발로 편향됨에 따라 일반적인 물류 시스템 분석에 기초한 허브 네트워크 수송 시스템의 이론적·해석적 분석은 상대적으로 결여되었으며 비현실적인 가정이 전제되거나 수송 시스템에서 나타나는 핵심적인 현상들을 모사할 수 없는 모형식이 제시되기도 하였다. 허브 네트워크 설계 모형은 일반적인 수송 시스템 특성을 반영함과 동시에 허브 네트워크에서만 나타나는 특수한 현상들을 모사할 수 있어야 한다. 물류 시스템에서 고려되는 다양한 비용요소(처리비용, 수송비용, 재고비용)에 대한 분석적 접근법을 토대로 수송 시스템의 일반성과 허브 네트워크의 특수성을 이론적으로 정립하고 이를 반영할 수 있는 모형식을 구축해야 한다.

### 1.2 본 연구의 목적 및 기대효과

본 연구는 허브 네트워크에서 나타나는 수송 규모의 경제 효과를 분석하고 이러한 수송 특성들을 반영할 수 있는 허브 네트워크 설계 모형을 개발하는 것을 목적으로 한다. 본 연구의 허브 네트워크 설계 모형은 다음과 같은 개선점을 토대로 허브 네트워크 수송 특성들을 반영할 수 있도록 구축된다.

첫째, 허브 네트워크에서의 비용 절감 효과는 수송 시스템 내의 모든 링크에서 수송량 및 수송 밀도의 증가로 인해 발생하는 ‘일반적’인 수송 특성이며 최적 운행빈도 결정과정을 모형식에 포함함으로써 ‘내생적’으로 결정될 수 있는 ‘상대적’인 비용 할인 효과임을 증명한다. 허브 입지 모형에서 고려되는 수송 규모의 경제는 최적 운행빈도를 결정하는 과정을 모형식에 통합함으로써 수송 거리에 대한 수송량의 비율인 수송밀도 또는 그 제곱근에 반비례하여 절감됨을 보일 수 있다.

둘째, 허브 네트워크 수송 특성들을 모사하기 위하여 일반 수송 시스템 문제에서 고려되는 비용 요소들인 재고비용(inventory cost)과 처리비용(handling cost)을 목적함수에 포함한다. 재고비용과 처리비용은 직결 수송 서비스에 대비한 허브 네트워크의 효율성을 검증하고 규명하기 위해 모형식에 포함되어야 하는 추가 지불비용일 뿐만 아니라 허브 네트워크에서의 수송량 집화로 인해 발생하는 수송 특성들을 반영한다. 본 연구에서는 비용요소별로 나타나는 허브 네트워크 수송 특성을 이론적으로 해석하고 모형식을 구축한 후 자료 분석을 통해 이론적 해석의 타당성을 증명한다.

셋째 허브 네트워크의 수송량 집중 현상을 모사하고 비현실적인 최적해 산출을 제어하기 위하여 허브 처리용량 제약과 링크의 운행빈도 및 수송용량 제약을 모형식에 도입한다. 허브 처리 용량 제약을 통해 허브에서의 작업 처리에 따른 혼잡과 지체를 효과적으로 반영할 수 있으며, 수송 링크의 운행빈도 제약은 최적 운행빈도 결정과정에서 비용 절감 할 인율을 결정하는 제약조건으로 작용한다.

마지막으로 제안된 모형식의 현실적 활용을 위하여 이를 해결할 수 있는 휴리스틱 알고리즘을 개발하고 그 적용성을 검토한다.

본 연구에서 제시되는 허브 네트워크 수송 시스템에 대한 이론적 분석과 허브 네트워크 설계 모형, 그리고 이를 해결하기 위한 해법 알고리즘은 효율적이고 합리적인 물류 시스템

표 1. 본 연구와 관련된 기존 연구

기존 연구	의사결정 변수	목적 함수	할인율	용량제약	모형구조
O'Kelly(1987)	L, A, R	T	C	N	QIP
Klincewicz(1991)	L, A, R	T	C	LC	IP
Campbell(1994)	L, A, R	T, H, L	N	N	IP
Skorin-Kapov 등(1994)	L, A, R	T	C	N	IP
Aykin(1995)	L, A, R	T	C	N	IP
Campbell (1996)	L, A, R	T, H, L	C	N	IP
Ernst 등(1996)	L, A, R	T	C	N	IP
O'Kelly 등(1996)	L, A, R	T, H, L	V	N	IP
Skorin-Kapov 등(1996)	L, A, R	T, H, L	C	N	QIP
O'Kelly 등(1998)	L, A, R	T	V	N	IP
Klincewicz (2002)	L, A, R	T	V	N	IP
Arnold 등(2004)	L, A, R	T	N	N	MILP
Racunica 등(2005)	L, A, R	T	V	N	MILP

L: 허브 입지 변수  
H: 허브 건설 비용  
N: 미고려  
IP: 정수계획법

A: 비허브 노드할당 변수  
L: 링크 건설비용  
HC: 허브 용량 제약  
MILP: 혼합 정수 선형 계획법

R: 경로 변수  
C: 상수 할인율  
LC: 링크 용량 제약

T: 수송비용  
V: 가변 할인율  
QIP: 2차 정수 계획법

템 구축의 원리적 토대를 마련할 수 있으며 다양한 수송 수단 간의 일반적인 물류 시스템에 대한 합리적인 네트워크 설계와 현실적인 최적 수송경로 및 수송계획을 제시할 수 있다. 또한 기존의 물류 시스템에 대한 현실적이고 합리적인 평가를 가능하게 할 뿐만 아니라 새로운 물류 시스템의 수송 및 운영계획을 비교, 검증함으로써 최적의 대안을 결정하는 데에 핵심적 역할을 수행할 수 있을 것으로 사료된다.

## 2. 모형식의 구축

### 2.1 모형식 구축의 가정 및 전제

최적의 허브 입지와 비허브 노드의 할당, 그리고 수송 경로를 결정하는 허브 네트워크 설계 문제는 허브 네트워크 정책에 따라 서로 다른 모형식 구조를 가진다(Aykin, 1995). 허브 네트워크 정책은 기점 노드와 종점 노드 간 직접 서비스를 허용하는 비계약 허브 정책(nonstrict hubbing policy)과 모든 노드가 허브에 연결되어야 하는 제약 허브 정책(strict hubbing policy)으로 구분된다. 각 비허브 노드가 단지 하나의 허브에만 연결되는 경우를 단일 할당 허브 입지 문제(single allocation hub location problem)라 하며 각 노드가 2개 이상의 허브에 연결될 수 있는 경우를 다중 할당 허브 입지 문제(multiple allocation hub location problem)라 한다.

허브 네트워크 정책 중 단일 할당 허브 입지 문제는 모형식의 구조가 가장 간단하면서도 허브 네트워크의 기본적인 수송 특성을 포함하고 있기 때문에 많은 선행 연구에서 분석의 대상이 되었다. 나아가 각 비허브 노드에서 발생한 수송량이 하나의 허브로 수송되어야 하기 때문에 다중 할당에 비하여 특정한 허브 및 허브 간 링크로 수송량이 집중될 수 있으며 수송 규모의 경제 효과와 수송 시스템의 추가적인 비용요소 및 용량 제약 조건이 더욱 중요한 영향을 미친다. 따라서 본 연구에서는 단일 할당 제약 허브 네트워크 정책을 중심으로 허브 네트워크 설계 모형을 구축하도록 한다.

단일 할당 제약 허브 정책 하에서 허브 시설을 점유하는 수송량은 이론적으로 1개 이상의 무수히 많은 허브를 거치는 것이 가능하다. 그러나 세 개 이상의 허브를 점유할 경우 경로의 수가 유의하게 증가할 것이며 매우 적은

수요만을 유인할 수 있어 어떠한 최적해도 나타나지 않을 것으로 예상된다(Racunica 등, 2005). 따라서 본 연구에서는 2개 이하의 허브를 점유하는 수송 서비스를 분석 대상으로 한다.

### 2.2 허브 네트워크 설계 모형의 의사결정 구조

허브 네트워크 설계의 의사결정은 일반적인 물류시스템의 의사결정과 몇 가지 차이점을 가진다.

첫째, 전자의 경우 기중점 노드 간 수송량의 경로가 허브 입지 결정 및 비허브 노드 할당에 따른 내생적 의사결정 변수로 포함되는 반면, 후자는 전략적 수준(시설 입지), 전술적 수준(수송 경로 및 빈도 수), 그리고 운영적 수준(수송 스케줄링)의 순차적 형태로 구성되며(Crainic 등, 1984) 따라서 수송 경로 또는 수송 계획은 시설 입지의 의사결정에 영향을 미치지 않는다. 이는 비계약 시설 용량이나 추가적인 지체 또는 비용 손실이 없다는 지나친 단순화에 기인한다. 그러나 수송 경로가 허브 입지에 영향을 미치며, 또한 허브 입지 역시 수송 경로 의사결정의 영향을 받는다는 것은 잘 알려진 사실이다(Aykin, 1995). 따라서 허브 입지 및 수송 경로 문제는 허브 네트워크 설계시 함께 고려되어야 한다.

둘째, 허브 네트워크의 가장 중요한 특성은 서로 다른 기중점 간 수송량을 집화(consolidation)한다는 데에 있다. 수송량의 집화로 인하여 규모의 경제 효과가 발생하고 수송규모가 증대됨에 따라 단위 수송비용이 절감된다. 단위 비용의 변화에 따라 수송경로 결정시 고려되었던 경로비용이 재설정되며 이러한 변화를 반영하여 최적 수송경로가 재결정되어야 한다. 수송량의 집화는 최적 운행빈도 및 수송규모와 밀접한 관련을 맺고 있으며 따라서 우리는 최적 운행빈도를 모형식의 의사결정변수로 포함하도록 한다.

마지막으로 최적 운행빈도 결정과정에서 일반적으로 고려되는 링크 및 허브의 용량 제약 조건은 허브 입지 및 노드 할당에 대한 제약 조건으로 작용한다. 특히 본 연구에서 다루고자 하는 단일 할당 허브 네트워크 문제의 경우 수송량이 할당된 허브를 이용하여 수송되어야 하기 때문에 허브 처리 및 링크의 수송량이 용량 한계를 넘어설 경우 허브 입지와 노드 할당이 재설정되어야 한다.

이상의 논의를 기반으로 할 때 허브 네트워크 설계 문제는 전략적 의사결정과 전술적 의사결정 간의 상호작용을 반영함으로써 허브 입지와 노드 할당, 수송 경로 및 최적 운행빈도가 통합적으로 결정되는 의사결정 구조로 구축되어야 한다. 본 연구에서는 이러한 허브 네트워크 설계의 분석 결과를 토대로 의사결정 변수를 i) 허브 입지의 선정, ii) 비허브 노드의 허브 노드 할당, iii) 최적 운행빈도로 설정하며 이는 그림 2에 제시하였다.

### 2.3 허브 네트워크 서비스 비용요소의 모형화

물류 비용은 연구의 목적에 따라 다양한 방식으로 분류되었다. 이 중 본 연구에서는 Blumenfeld 등(1985)의 물류 비용 분류를 기반으로 허브 네트워크의 운영 및 건설 비용을 정량화한다. 이는 그림 3과 같다.

비용요소를 수식으로 정리하기에 앞서 표기의 간편화를 위

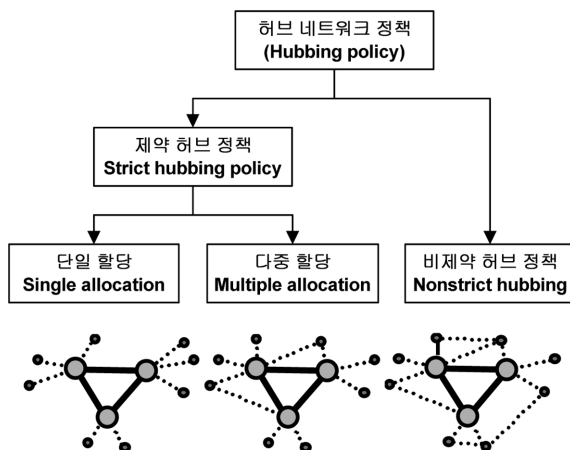


그림 1. 허브 네트워크 정책 개요

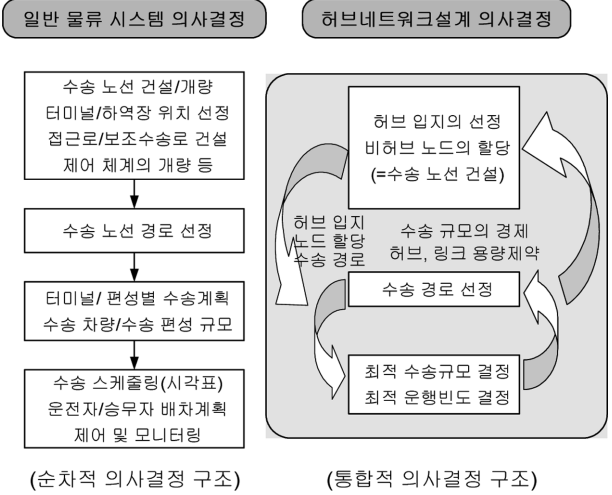
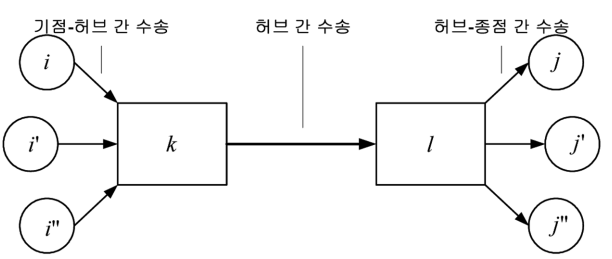


그림 2. 허브 네트워크 설계 의사결정의 특수성



링크 건설비용:  $C^{LC} = C_{ik}^{LC} + C_{kl}^{LC} + C_{lj}^{LC}$     허브 건설비용:  $C^{HC} = C_k^{HC} + C_l^{HC}$   
 링크 수송비용:  $C^{TR} = C_{ik}^{TR} + C_{kl}^{TR} + C_{lj}^{TR}$     분류/환적비용:  $C^{DT} = C_k^{DT} + C_l^{DT}$   
 수송지체 비용:  $C^{TT} = C_{ik}^{TT} + C_{kl}^{TT} + C_{lj}^{TT}$     서비스지체비용:  $C^{SD} = C_k^{SD} + C_l^{SD}$   
 빈도지체 비용:  $C^{FR} = C_{ik}^{FR} + C_{kl}^{FR} + C_{lj}^{FR}$

그림 3. 허브 네트워크 서비스와 비용 요소

하여 링크 경유 수송량을  $Q^L$ , 허브 경유 수송량을  $Q^H$ 로 표기하며 이는 다음과 같이 계산된다.

$$Q_{ik}^L = \sum_{j \in D} z_{ik} W_{ij}$$

$$Q_{kl}^L = \sum_{i \in O} \sum_{j \in D} z_{ik} z_{jl} W_{ij}$$

$$Q_{ij}^L = \sum_{i \in O} z_{jl} W_{ij}$$

$$Q_k^H = \sum_{i \in O} \sum_{j \in D} (z_{ik} + z_{jk}) W_{ij}$$

식 (1)의 각 링크 수송량은 기점~허브 간, 허브 간, 허브~종점 간 링크 수송량을 의미하며 식 (2)는 허브 k를 경유하는 수송량으로, 첫 번째 항은 기점으로부터의 수송량을, 두 번째 항은 종점으로 연결되는 수송량을 나타낸다. 허브 네트워크 서비스에서, 비용요소들은 링크 및 허브 건설비용, 수송비용, 빈도지체 비용, 수송시간지체 비용, 분류/환적 비용 및 서비스 지체 비용 등으로 구성되며 이에 대한 상세한 내용은 Daganzo(1996), Crainic 등(1984), Campbell(1994), O'Kelly 등(1998)을 참조할 수 있다.

$$C^{LC} = \frac{tp \cdot uc^L}{cf \cdot dp} \sum_{i \in O} \sum_{k \in P} d_{ik} z_{ik}$$

$$+ \frac{tp \cdot uc^L}{cf \cdot dp} \sum_{i \in O} \sum_{k \in P} \sum_{l \in P} \sum_{j \in D} d_{kl} z_{kl} z_{lj} + \frac{tp \cdot uc^L}{cf \cdot dp} \sum_{l \in P} \sum_{j \in D} d_{lj} z_{lj}$$

$$C^{HC} = \frac{tp \cdot uc^H}{cf \cdot dp} \sum_{j \in P} z_j$$

$$C^{TR} = \sum_{i \in O} \sum_{k \in P} \sum_{l \in P} \sum_{j \in D} uc_i^{TR} (d_{ik} f_{ik}^L + d_{kl} f_{kl}^L + d_{lj} f_{lj}^L)$$

$$C^{FR} = \frac{tp tv_c}{2} \sum_{i \in O} \sum_{k \in P} \frac{Q_{ik}^L}{f_{ik}^L} + \frac{tp tv_c}{2} \sum_{k \in P} \sum_{l \in P} \frac{Q_{kl}^L}{f_{kl}^L} + \frac{tp tv_c}{2} \sum_{l \in P} \sum_{j \in D} \frac{Q_{lj}^L}{f_{lj}^L}$$

$$C^{DT} = \sum_{i \in O} \sum_{k \in P} tv_c d_{ik} \frac{Q_{ik}^L}{f_{ik}^L} + \sum_{k \in P} \sum_{l \in P} tv_c d_{kl} \frac{Q_{kl}^L}{f_{kl}^L} + \sum_{l \in P} \sum_{j \in D} tv_c d_{lj} \frac{Q_{lj}^L}{f_{lj}^L}$$

$$C^{SD} = \sum_{i \in O} \sum_{j \in D} \left( \sum_{k \in P} z_{ik} + \sum_{l \in P, l \neq k} z_{jl} \right) uc^{DT} W_{ij}$$

$$C^{SD} = \sum_{k \in P} \left[ \frac{tv_c tput^{DT} Q_k^H}{tp - ut^{DT} Q_k^H} \right]$$

식 (1)과 (2)는 각각 허브 및 링크 건설의 감가상각비용의 합이다. 식 (3)과 (4)는 각각 총 수송비용과 총 빈도지체 비용을 나타낸다. 두 비용은 모두 링크 운행빈도 변수를 포함하며, 따라서 어떤 링크 (r, s)에 대한 총 빈도지체 비용과 수송비용의 합은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$C_{rs}^{TR} + C_{rs}^{FR} = \left[ uc_i^{TR} d_{rs} f_{rs}^L + \frac{tv_c tp}{2} \left( \frac{\Gamma}{f_{rs}^L} \right) \right] \geq \sqrt{2uc_i^{TR} d_{rs} tv_c \Gamma}$$

여기서,

$$\Gamma = \begin{cases} \sum_{q \in D} z_{rs} W_{rq} & , \text{if } r \in O \vee s \in P \\ \sum_{p \in O} \sum_{q \in D} z_{pr} z_{qs} W_{pq} & , \text{if } r \in P \vee s \in P \\ \sum_{p \in O} z_{rs} W_{ps} & , \text{if } r \in P \vee s \in D \end{cases}$$

식 (10)에서 확인할 수 있듯이 각 링크의 최소 비용은 수송량과 수송 거리의 곱, 즉 운행실적의 제곱근에 비례하여 증가하는 비선형 오목곡선 형태로 나타난다. 이러한 특성은 단위 비용의 최소값이 수송밀도의 제곱근에 비례함을 의미하는 것으로 쉽게 이해할 수 있다. 최적 운행빈도는 링크의 수송밀도에 비례하여 결정되며 이는 다음과 같다.

$$f_{rs}^L = \sqrt{\frac{tv_c tp \Gamma}{2uc_i^{TR} d_{rs}}}$$

각 링크에서 소요되는 빈도지체와 수송비용 합 최소 비용은 운행실적이 증가함에 따라 비선형 오목함수의 형태로 증가한다. 또한 이러한 증가 패턴은 최적 운행빈도가 링크의 최대 운행빈도에 도달하기 전까지 유지된다. 최대 운행빈도를 넘어서는 경우 운행빈도는 일정한 값, 즉 최대 운행빈도  $f_{max}$ 를 가지며 따라서 수송비용은 각 링크의 수송거리에 의해, 그리고 빈도지체는 각 링크의 수송량에 의해 결정된다.

나아가 최소 비용은 최대 수송규모 제약에도 영향을 받는다. 링크의 수송량을 최적 운행빈도로 나눈 값인 최적 수송규모가 최대 수송규모보다 클 경우 운행빈도는 링크의 총

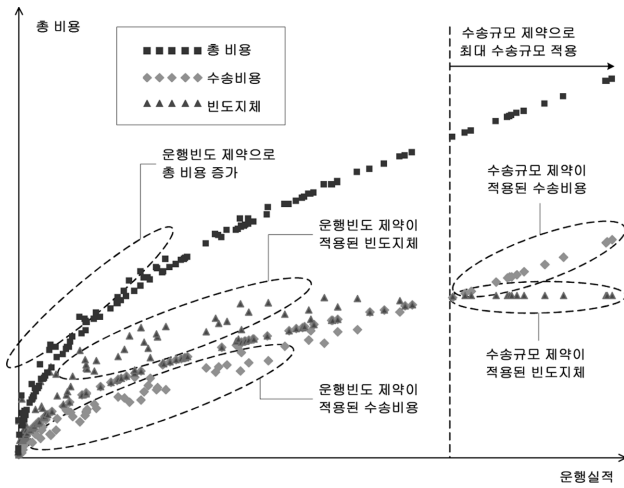


그림 4. 수송비용과 빈도지체 총 비용의 변화

수송량을 최대 수송규모로 나는 값이 적용된다. 따라서 수송 규모의 크기에 비례하는 빈도지체는 일정한 상수값을 나타내는 반면, 수송비용은 운영빈도에 비례하여 증가하는 패턴을 가진다.

이러한 수송비용과 빈도지체 비용 합의 최소비용 곡선은 네트워크에 포함된 어떤 링크 ( $i, k$ )에 대하여 그림 4와 같이 도시할 수 있다. 그림에서 확인할 수 있듯이 수송규모 제약이 적용되는 경우 총 수송비용은 선형의 형태로 증가하는 반면 빈도지체는 일정한 값을 가진다. 운영빈도 제약이 적용되면 수송비용은 최적 운영빈도에 의해 계산된 값보다 작게 산출되는 반면 빈도지체는 최적 운영빈도보다 작은 최대 운영빈도가 적용됨에 따라 더 크게 계산된다. 운영빈도 제약이 절감되는 수송비용보다 증가하는 빈도지체가 더 크기 때문에 최적 운영빈도에 의해 계산된 최소 총 비용보다 큰 값을 가진다.

식 (7)과 (8)은 각각 통행시간 지체비용과 분류/환적비용의 합이다. 식 (9)는 허브에서의 서비스 지체의 합을 나타내며, 이는 Crainic 등(1984)에서 제시된 바 있다.

전술하였듯이 허브 네트워크 서비스에서는 직결 서비스와 달리 링크 수송유량과 허브 처리유량이 집화되는 특성을 가진다. 이에 따라 링크 수송량의 집화는 최적 운영빈도에 영향을 미쳐 수송비용 및 빈도지체를 변화시킨다. 한편 허브에서 처리되는 수송량들은 허브 시설에서 다루어지는 생산 규모의 증가로 인해 단위 수송량 당 고정비용이 감소하는 반면 작업을 대기하는 지체로 인하여 서비스 지체는 증가하는 형태로 나타난다. 이러한 수송 규모의 경제 효과에 따른 비용의 변화들은 각 비용 요소들에 대한 분석을 기반으로 정량화될 수 있다. 그림 5는 이러한 내용을 정리한 것이다.

#### 2.4 모형화

본 연구에서는 Campbell(1994)에서 제시된 단일 할당 허브 입지모형을 기본 모형으로 하여 허브 네트워크 수송 시스템의 특성들을 반영한 허브 네트워크 설계 모형을 구축하였다. 모형식은 허브 처리용량 제약과 링크의 운영빈도 및 수송용량 제약이 추가된다. 허브 네트워크 수송 특성을 반영할 수 있는 단일 할당 허브 네트워크 설계 모형이 다음과

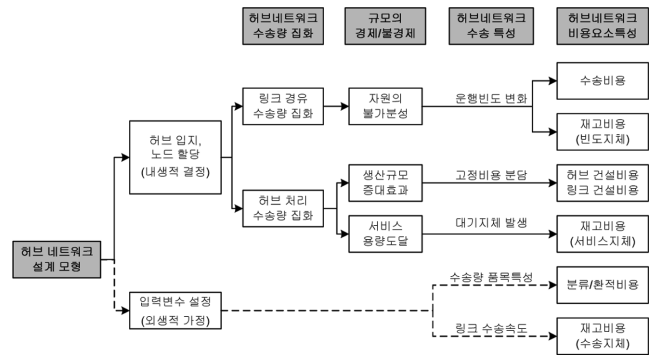


그림 5. 허브 네트워크 서비스의 수송 규모의 경제

같이 개발되었다.

$$\min Z = [C^{LC} + C^{hc} + C^{TR} + C^{DT} + C^{FR} + C^{TT} + C^{SD}]$$

subject to

$$\sum_k z_k = p, \quad (12)$$

$$\sum_k z_{ik} = 1, \quad \forall i \quad (13)$$

$$\sum_{i \in \mathbf{O}} \sum_{j \in \mathbf{D}} z_{ij} W_{ij} \leq K_{kl}^{\max} f_{kl}^h, \quad \forall k, l \quad (14)$$

$$\sum_j z_{ik} W_{ij} \leq K_{ik}^{\max} f_{ik}^s, \quad \forall i, k, \quad (15)$$

$$f_{kl}^h \leq z_{ik} z_{jl} f_{kl}^{\max}, \quad \forall k, l \quad (16)$$

$$f_{ik}^s \leq z_{ik} f_{ik}^{\max}, \quad \forall i, k, \quad (17)$$

$$ut^{DT} \sum_{i \in \mathbf{O}} \sum_{j \in \mathbf{D}} \left( \sum_{k \in P/l \neq k} z_{jl} \right) W_{ij} < tp, \quad \forall k, \quad (18)$$

$$z_{ik} \leq z_k \leq 1, \quad \forall i, k, \quad (19)$$

$$f_{ik}^s, z_{ij}, z_{ik} \geq 0 \text{ 이고 정수}, \quad \forall i, k, t. \quad (20)$$

각 비용요소들은 식 (3)~식 (9)에 제시되어 있다. 비용요소별 계산과정에서 모형식 계산과정의 오류를 피하기 위하여 각 비용요소에 대하여  $i \neq k, l \neq j, k \neq l$  조건이 추가된다.

식 (12)~(14)와 식 (18)~(20)는 기존 연구에서 제시된 모형식의 제약조건과 동일하다. 식 (14)와 식 (15)는 최적 운영빈도가 설정된 모든 수송량을 처리할 수 있도록 결정되어야 한다는 최소 운영빈도 제약 또는 최대 수송규모 제약을 의미한다. 식 (16)과 식 (17)은 각각 허브 간 링크와 비허브-허브 간 링크의 최대 운영빈도 제약을 나타내며, 식 (18)은 허브에서 처리할 수 있는 수송량을 나타내는 허브 처리용량 제약식이다. 링크의 최대 운영빈도와 최대 수송규모에 의해 결정되는 링크 수송용량 제약식은 식 (14)~식 (17)을 이용하여 표현될 수 있기 때문에 모형식에 별도로 포함되지 않는다.

본 연구에서 구축된 허브 네트워크 설계 모형은 기존 연구에서 제시되었던 수송비용 또는 건설비용 이외에도 허브 네트워크 서비스의 수송 특성이 나타나는 다양한 비용 요소들을 포함한다. 수송비용과 빈도지체의 경우 허브 네트워크

의 링크 수송량 집화에 따른 운행빈도 변화 특성을 반영하고 규모의 경제 효과를 내생적으로 결정하기 위하여 모형식에 반영된다. 단위 수송비용과 빈도지체 합의 최소화비용은 최적 운행빈도에 의해 할인율이 결정되고 최대 운행빈도에 따라 할인율의 크기가 변화하며 최대 운행빈도와 최대 수송규모의 곱인 수송용량에 의해 제약된다.

직결 수송서비스에 비하여 추가적으로 소요되는 허브 건설비용과 수송량 집화에 의해 절감될 수 있는 링크 건설비용도 모형의 일반화를 위하여 포함된다. 허브 처리 수송량에 대해 발생하는 규모의 불경제 효과인 혼잡과 지체비용을 반영하기 위하여 서비스 지체비용도 모형식에 반영한다. 허브 서비스 지체 비용은 과도한 수송량이 일부 허브에 집중되는 것을 제어함으로써 허브 입지 및 노드 할당에 대한 제약조건으로도 작용한다. 분류/환적 비용과 수송지체의 경우 허브 네트워크 수송량 집화 특성에 영향을 받는 요소는 아니지만 직결 수송 서비스에 비하여 추가적인 비용 소모를 야기할 수 있기 때문에 모형식에 포함한다.

### 3. 기존연구결과와의 비교 분석

#### 3.1 비교분석을 위한 가정 및 전제

허브 입지 문제에 대한 기존 연구들은 O'Kelly(1987)의 허브 입지 모형을 기반으로 모형식을 개선, 변형함으로써 근사 최적해를 효율적으로 계산하는 연구들을 중심으로 수행되었다. 모형식을 구축한 일부 연구들의 경우 최적해 계산을 위한 계수값들이 제시되지 않았거나(O'Kelly 등, 1998), 다른 형태의 네트워크 정책을 기반으로 분석을 수행하여(Aykin, 1994, 1995) 본 연구에서 구축한 모형식과의 직접적인 비교가 불가능하였다. 본 연구의 모형식과의 비교가 가능한 몇 가지 기존 연구들을 기반으로 비교를 수행하였으며 이를 위하여 다음과 같은 전제를 설정하였다.

첫째, O'Kelly(1987)의 연구에서는 허브 간 링크의 외생적 상수 할인율에 대한 실증적 검증 대신 0.1~1.0 사이의 0.1 단위의 값을 적용하여 할인율 변화에 따른 최적해 결과를 비교하였다. 본 연구에서는 기존 연구에서 가장 합리적인 결과를 산출하는 것으로 알려진 상수 할인율  $\alpha$ 를 0.8로 설정하여 모형식의 결과를 산출하였다.

둘째, Racunica 등(2005)은 구분적 선형 비용을 적용하였으나 각각의 기율기 및 절편값들이 제시되어 있지 않아 기본 모형식 구조에서 적용된 허브 간 링크의 수송량 및 허브-종점 간 링크의 수송량에 대한 지수함수를 적용하여 분석하였다(각각의 지수값은 제시된 0.5와 0.6을 사용).

셋째, 본 연구에서 구축된 모형식은 운행빈도-거리 당 수송비용을 이용하는 반면 O'Kelly(1987)와 Racunica 등(2005)은 수송량-거리 당 수송비용을 적용하기 때문에 본 연구의 운행빈도-거리 당 수송비용을 평균 수송규모로 나누어 계산된 결과를 기존 연구 모형식의 수송비용 단가로 적용하였다. 분석에 사용된 데이터는 수송규모 제약과 운행빈도 제약이 각각 적용될 경우에 대하여 현실 데이터를 적용하였다. 수송규모 제약이 적용되는 경우는 항공 네트워크를 이용하였으며 『Traffic by Flight Stage 2001』 (ICAO, 2003)에서 제시된 일반 화물 수송자료를 기반으로 분석을 수행하였다.

2001년을 기준으로 화물 실적 순위 25위 내의 공항 중 수송량이 0인 기종점 자료를 최소화할 수 있는 10개의 공항을 채택하여 분석을 수행하였다. 운행빈도 제약시의 데이터는 2004년 철도 통계연보의 국내 화물 철도 수송 권역별 OD를 기반으로 네트워크를 구축하고 분석을 수행하였다. 항공 수송 네트워크와의 비교를 위하여 60개의 기종점 중 10개의 권역을 대상으로 집계하여 분석하였다. 이상의 분석을 위한 데이터는 부록에 별도로 제시하였다.

#### 3.2 기존 연구와의 규모의 경제 효과 비교

그림 6과 그림 7은 각각 수송규모 제약과 운행빈도 제약이 적용될 경우 기존 연구들과 본 연구의 규모의 경제 효과를 비교하여 도시한 것이다

그림 6은 최적 수송규모가 최대 수송규모보다 커서 수송규모 제약이 적용될 경우를 나타낸 것이다. 앞서 서술하였듯이 최적 운행빈도 결정과정에서 계산된 최적 수송규모, 즉 총 수송량을 최적 운행빈도로 나눈 값이 최대 수송규모보다 커서 수송규모 제약이 적용될 경우 링크의 운행빈도는 최적 운행빈도보다 큰 값으로 결정된다. 따라서 수송비용은 제약 조건이 고려되지 않는 상황에 비하여 더 많은 비용이 소요된다. 그림 6에서 타원으로 표시된 영역 내의 결과는 수송규모 제약조건이 적용된 본 연구의 모형식 결과를 나타낸다.

반면 그림 7과 같이 최적 운행빈도가 링크의 최대 운행빈도보다 큰 값으로 계산되어 최대 운행빈도로 수송이 이루어질 경우 수송비용의 크기가 운행빈도에 비례하기 때문에 제약조건이 없는 경우에 비하여 더 작은 값을 가진다. 물론 비제약 모형에 비하여 수송비용의 크기는 작아지지만 빈도지체 비용의 증가분이 더 크기 때문에 수송비용과 빈도지체 비용의 합은 비제약 조건에 비하여 더 큰 값으로 산출된다.

기존 연구 결과들은 수송비용 단가를 비롯한 적용된 모수 값이 달라짐에 따라 비용곡선 간의 크기 순위나 교차점의 위치가 서로 달라지긴 하지만 기본적인 모형 형태는 유사한 것으로 분석되었다. O'Kelly(1987)의 비허브-허브 간 링크와 Racunica 등(2005)의 기점-허브 간 링크는 수송 할인율이 적용되지 않는 선형의 기울기를 가지는 비용 곡선이 산출된다. 상수 할인율  $\alpha$ 가 적용되는 O'Kelly(1987)의 허브 간 링크

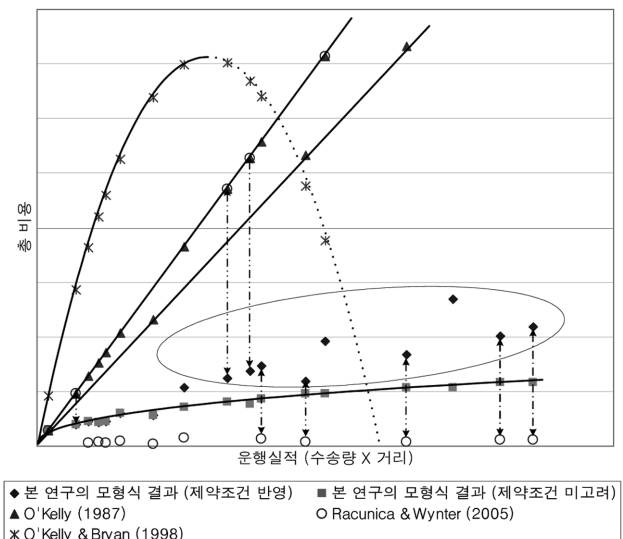


그림 6. 규모의 경제 효과 비교 (수송규모 제약)

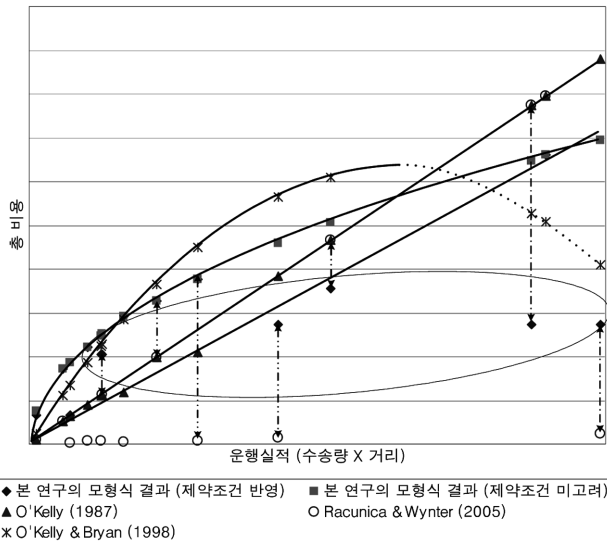


그림 7. 규모의 경제 효과 비교 (운영빈도 제약)

크 역시 선형 비용함수가 산출되지만 할인율에 의하여 허브~허브 간 링크에 비하여 더 작은 기울기를 가진다. 선형 비용함수의 특성상 운영실적이 작은 링크의 경우 Racunica 등(2005)을 제외한 모든 연구의 비용곡선에 비하여 수송비용이 작게 계산되는 반면, 운영실적이 큰 링크에 대해서는 수송비용 역시 매우 큰 값을 가지는 것을 확인할 수 있다. 이는 많은 기존 연구에서 지적하였듯이 수송실적의 크기가 증가함에 따라 할인율이 증가하는 규모의 경제 효과를 현실적으로 반영하기 어렵다는 것을 의미한다.

O'Kelly 등(1998)의 모형은 운영실적이 증가함에 따라 단위 수송비용이 감소하여 총 수송비용은 오목비용 곡선의 형태를 가진다. 그러나 총 수송비용이 일정 크기 이상이 되면 총 비용의 크기가 감소하는 구간이 나타난다. 더욱이 이러한 총 비용이 감소하기 시작하는 범위는 외생적으로 주어지는 모수값에 의해 결정되기 때문에 현실적 자료에 기반한 정확한 정산 결과가 제시되지 않는다면 이러한 모형 적용은 수송량이 커질수록 총비용이 감소하는 비현실적인 결과를 산출할 우려가 있다.

Racunica 등(2005)의 모형식에서 허브 간 링크 및 허브~종점 간 링크는 수송거리와 무관하게 수송량의 지수함수의 형태(각각 0.5와 0.6의 지수)로 비용함수가 구성되기 때문에 다른 연구 결과에 비하여 수송비용이 매우 작게 계산되었다. 또한 할인율이 적용되지 않는 기점~허브 간 링크와 할인율이 적용되는 허브 간 및 허브~종점 간 링크의 비용 차이가 매우 크게 나타나 현실적으로 검증되지 않은 모수값을 적용할 경우 모형 결과에 심각한 오류를 가져올 수 있을 것으로 사료된다. 이러한 모형식 간의 비교를 그림 8에 제시하였다.

그림 8에서 알 수 있듯이, 본 연구의 모형식은 운영빈도 제약과 수송규모 제약 하에서 최적 운영빈도를 결정할 수 있도록 함에 따라 링크 수송량 변화에 따른 할인율이 내생적으로 결정될 수 있도록 구축하였다. 기존 모형에서 고려하지 않았던 링크 운영빈도 및 링크와 허브의 수송규모 제약을 추가적으로 고려하였으며, 허브 네트워크의 수송 특성과 관련한 다양한 비용요소들을 포함함으로써 허브 네트워크에서 나타나는 수송 규모의 경제 효과를 반영할 수 있는 모형

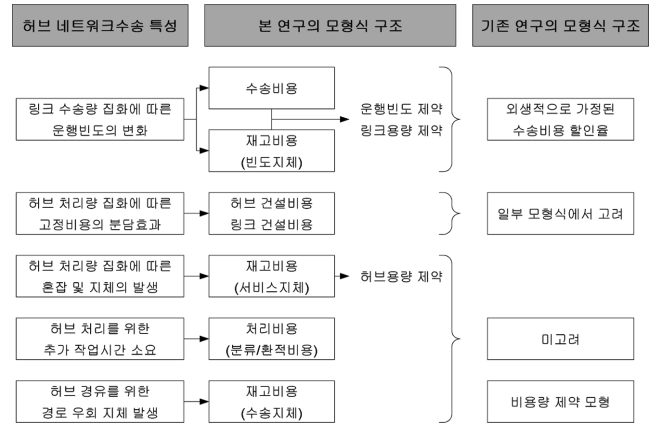


그림 8. 기존 연구와 본 연구의 모형식의 구조 비교

식을 구축하였다. 본 연구에서 구축한 모형식은 운영실적의 크기에 무관하게 일정한 할인율이 적용되거나(O'Kelly, 1987) 링크에 따라 매우 큰 할인율의 차이가 발생(Racunica 등, 2005)하는 기존 연구들과 달리 현실적인 제약조건을 반영하여 합리적인 규모의 경제 효과를 모사할 수 있는 것으로 분석되었다.

#### 4. 알고리즘의 개선

전술하였듯이 허브 입지 문제에서 제시된 모형은 NP-complete로 합리적인 시간 내에 문제 해결이 어렵기 때문에 이를 위한 휴리스틱 해법 연구가 활발히 진행되었다. O'Kelly(1987)에서 제시된 일반적인 열거기법이나 거리 기반 할당 규칙 이외에도 Lagrangian relaxation으로 정수 제약을 완화하거나 Greedy Interchange 기법을 통해 노드할당을 반복하는 등 다양한 기법을 적용하였다.

이러한 다양한 기법들이 적용되었음에도 불구하고 대부분의 연구에서는 범용의 메타 휴리스틱 해법을 허브 입지 결정 연구에 적용하여 모형식을 해결하였다. 기존 연구에서 적용된 메타 휴리스틱 해법으로는 Simulated Annealing 해법, Genetic Algorithm 기법, Tabu Search 해법 등이 있으며 이 중 Skorin-Kapov and Skorin-Kapov (1994)에서 적용된 Tabu Search 해법은 O'Kelly(1987)에서 제시된 문제에 대하여 가장 좋은 해를 산출하는 것으로 분석되었다. 따라서 본 연구에서는 이러한 기존 연구 결과를 기반으로 기존 연구에서 제시된 Tabu Search 해법을 본 연구의 모형식에 적합하도록 개선하는 알고리즘을 제시한다. Tabu Search에 대한 자세한 내용은 Pardalos and Resende(2002), 김여근, 윤복식 등(1997)을 참조할 수 있다.

Skorin-Kapov and Skorin-Kapov(1994)에서 제시된 TABU-HUB의 의사결정 변수는 허브 입지 변수 및 노드 할당 변수이다. 단일 할당 허브 입지 모형이기 때문에 수송 경로는 노드 할당 변수에 의해 자동적으로 결정된다. 비용함은 수송비용만 고려되었으며 간단한 모형식을 이용하여 최적해를 산출하였다.

본 연구에서도 의사결정 변수는 허브 입지 변수와 노드 할당 변수이지만 모형식에서 결정되는 추가 변수로서 물류 시스템 수송계획과 관련한 운영빈도 변수가 포함된다. 운영빈도는 링크의 운영빈도 및 수송용량 제약 하에서 허브 입

지 및 노드 할당에 다른 최적 운행빈도 계산과정에 의해 결정된다.

또한 일반적인 네트워크 설계 모형에 반영되는 허브 및 링크 건설비용과 수송비용 이외에도 수송지체, 허브에서의 분류/환적 비용 및 서비스 지체를 모형식에 포함하며, 운행빈도 변수와 관련된 빈도지체도 고려하였다.

복잡한 모형식의 형태로 인하여 기존 TABUHUB 알고리즘을 곧바로 적용하는 것은 불가능하다. 이 절에서는 추가적으로 고려되어야 하는 사항들을 기술하고 이를 포함한 알고리즘을 제시한다.

앞 절에서 제시하였듯이 본 연구에서 추가된 운행빈도는 경제적 주문량(EOQ)의 개념을 기반으로 최적 운행빈도로 계산되어 모형식에 반영된다. 운행빈도 변수의 정수성으로 인하여 운행빈도는 정수로 계산되어 모형식에 적용된다. 계산상의 편의를 위하여 운행빈도의 정수화는 가우스 기호  $[ ]$ 를 이용하여 처리하였으며 이는 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$f_{rs}^t = \left[ \frac{tv_c t p \Gamma}{\sqrt{2uc_t TR d_{rs}}} + 0.5 \right]$$

여기서,  $[A]$ :  $A$ 에 대한 가우스 기호, 즉  $n \leq A \leq n+1$  이면  $[A]=n$ ,  $n$ 은 정수

위에 포함된 상수 0.5는 수송량에 따라 결정되는 최적 운행빈도에 대한 올림 처리를 반영하기 위하여 포함되었다.

이상의 내용을 토대로 개선된 알고리즘을 그림 9에 제시하였다. 초기해는 Klineciewicz(1989)나 Skorin-Kapov and Skorin-Kapov(1994)에서와 마찬가지로 진입, 진출 수송량이 큰  $p$ 개의 노드를 통해 허브 입지를 결정하며 최근거리 허브에 노드가 할당되도록 노드할당 초기해를 결정한다.

입지결정 휴리스틱은 결정된 초기해에 대하여 아직 검사되지 않은 비허브 노드와 허브 노드를 교환하면서 시작한다. 교환된 노드에 대하여 비허브 노드 재할당을 수행함으로써 노드할당 타부 휴리스틱을 수행한다.

노드의 재할당은 비용 계산을 기반으로 이루어진다. 용량 제약이 없는 비용량제약 상태에서 계산된 비용을 통해 비허브 노드를 재할당한 후, 상·하한 제약을 만족하는 최적 운행빈도를 결정한다.

할당된 수송량을 최적 운행빈도가 처리할 수 있는지 검토한 후 불가능한 경우 최소 운행빈도를 계산하여 대체한다. 링크 최대 운행빈도 제약을 기반으로 갱신된 수송비용과 빈도지체를 고려하여 비허브 노드의 재할당이 수행되며 링크 및 허브의 최대 처리 용량 제약에 따라 재할당할 비허브 노드를 재선택한다.

링크의 운행빈도 제약이 만족되고 목적함수가 개선된다면 현재 해는 갱신되며 타부 목록에 노드 할당이 추가된다. 이러한 노드할당 타부 휴리스틱은 모든 비허브 노드의 할당을 검사할 때까지 반복되며 이후 입지 타부 목록을 갱신하고 입지 결정 타부 휴리스틱의 반복횟수를 갱신하고 입지 결정 타부 휴리스틱을 재시작한다. 모든 비허브 노드의 입지 교환이 검사되면 장기 메모리 반복횟수가 갱신되고 사전에 설정된 최대 장기 메모리 반복횟수까지 수행되면 지금까지의 분석된 해들을 검토하여 최적해를 산출한다.

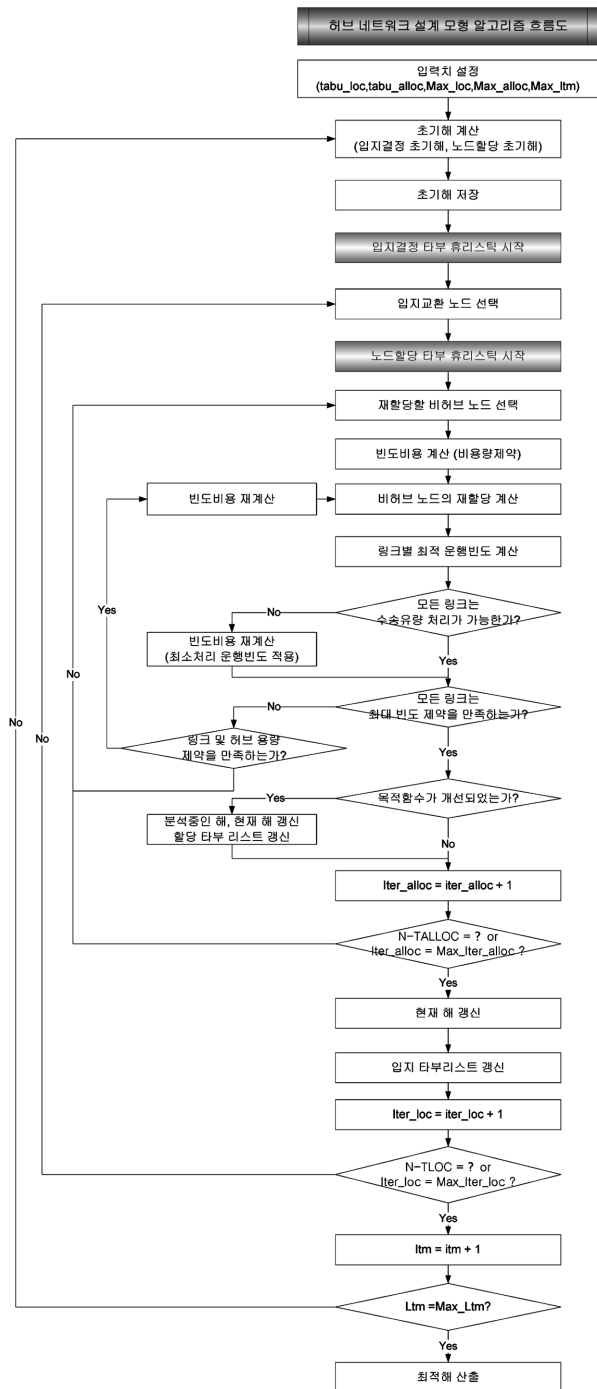


그림 9. 본 연구에서 개선된 허브 네트워크 설계 알고리즘 흐름도

## 5. 결 론

본 연구는 물류 시스템 분석을 기반으로 허브 네트워크 수송 특성을 반영할 수 있는 허브 네트워크 설계 모형을 개발하는 것을 목적으로 하였다. 일반적인 수송 시스템의 의사결정 과정을 기반으로 허브 네트워크 의사결정은 허브 입지, 노드 할당, 수송 경로 및 최적 운행빈도 결정 간의 상호작용을 반영할 수 있는 통합적인 의사결정 구조로 구성되어야 함을 확인하였다. 허브 네트워크 수송 시스템 분석을 토대로 개별 비용요소들을 설정하고 허브 네트워크의 수송량 집화 특성이 비용요소별로 미치는 효과를 분석함으로써 수송 특성을 반영하기 위하여 고려되어야 할 비용요소를 선별하였다.

단위 수송량의 빈도지체와 수송비용의 절감효과는 기존 연



구와 같은 외생적인 가정을 도입할 필요 없이 최적 운행빈도 결정과정을 모형식에 포함함으로써 내생적으로 결정할 수 있다. 고정비용으로 고려되는 허브 건설비용과 링크 건설비용은 서로 다른 비용 절감 효과를 가지며, 단위 허브 건설비용은 처리 수송량에만 반비례하는 반면 링크 건설비용은 링크의 수송밀도에 반비례하여 절감되는 것으로 분석되었다.

허브 네트워크에서 발생하는 규모의 경제 또는 밀도의 경제에 의한 비용 절감 효과 이외에도 수송량 집화와 집중에 따른 규모의 불경제 효과를 고려하기 위해 허브에서 대기하는 서비스지체 비용을 모형에 포함하였다. 허브 처리 수송량이 용량에 근접함에 따라 지체 비용이 급격하게 증가하는 형태로 반영함으로써 허브에서 발생하는 혼잡 및 지체 효과를 현실적으로 모사할 수 있도록 하였다. 또한 허브 네트워크에서의 수송량 집화 특성과는 관련이 없지만 직결 수송 서비스에 비하여 추가적으로 지불되는 비용요소인 허브에서의 분류/환적 처리비용과 경로 우회에 따른 수송지체 비용도 허브 네트워크 설계의 현실적인 타당성 평가를 위하여 모형식에 반영하였다.

마지막으로, 모형식 구축에 요구되는 링크 및 허브의 용량 제약 조건을 설정하고 수송 특성을 반영하는 비용요소와의 연관성을 규명하였다. 용량 제약 조건은 과도한 수송량이 일부 허브와 링크로 집중되는 비현실적인 결과가 산출되지 않도록 제어하는 한편, 링크의 최적 운행빈도 결정과 허브 서비스 지체 결정에 개입함으로써 허브 네트워크 수송 특성을 반영할 수 있도록 보조해주는 역할을 수행한다. 또한 본 연구와 같은 단일 할당 네트워크 정책에서는 비합리적인 허브 입지와 노드 할당을 제어하는 역할도 수행한다.

본 연구에서 구축한 모형식은 이론적 정합성을 보증하는 허브 네트워크 설계 모형이며 모형식에 포함된 각 비용요소와 제약조건들은 허브 네트워크 수송 시스템 분석에서 도출되었던 해석적 결과들을 정량화하여 모사할 수 있는 것으로 평가되었다. 본 연구에서 구축한 모형식과 알고리즘은 효율적이고 합리적인 물류 시스템 구축의 이론적 토대를 마련하고 현재 및 장래의 물류 시스템에 대한 현실적이고 합리적인 평가 수행에 기여하는 한편 동북아 허브 입지 구축의 현실적 효용성도 확보할 수 있을 것으로 사료된다.

## 기 호

- O, D, P**: 각각 네트워크의 기점, 종점 및 허브 노드 집합  
 $n$ : 전체 노드 수.  $n \in \mathbf{O} \cup \mathbf{D}$   
 $p$ : 모형식에서 결정해야 할 허브 수.  $p \in \mathbf{P}$   
 $h, s$ : 각각 허브 간, 허브비허브 간 링크를 나타내는 링크 유형  
 $t_{vc}$ : 재화  $c$ 의 시간가치  
 $cf$ : 운영일수 전환 계수  
 $dp$ : 시설 내구연수  
 $tp$ : 분석 대상 계획 기간  
 $cf$ : 운영일수 환산단위  
 $dp$ : 시설 내구연수  
 $d_{ij}$ : 방향 링크  $(i, j)$ 의 거리  
 $W_{ij}$ : 노드  $i \rightarrow j$ 의 기종점 수송량

- $C^{LC}$ : 전체 링크의 건설비용  
 $C^{HD}$ : 전체 허브의 건설비용  
 $C^{TR}$ : 허브 네트워크의 수송비용  
 $C^{DF}$ : 허브 네트워크의 분류/환적비용  
 $C^{RR}$ : 허브 네트워크의 빈도 지체  
 $C^{TF}$ : 허브 네트워크의 수송 지체  
 $C^{SD}$ : 허브 네트워크의 분류/환적지체  
 $uc^L$ : 단위 거리 당 링크 건설비용  
 $uc_i^{TR}$ : 링크 유형  $i$ 의 단위 거리, 단위 빈도 당 수송비용  
 $uc^H$ : 단위 허브 건설비용  
 $uc^{DT}$ : 단위 수송량의 분류 및 환적비용  
 $ur^{DT}$ : 단위 수송량의 분류 및 환적지체  
 $z_j$ : 노드  $j$ 에 허브가 입지하는 경우 1, 그렇지 않으면 0  
 $z_{ik}$ : 비허브 노드  $k$ 가 허브 노드  $s$ 에 할당되면 1, 그렇지 않으면 0  
 $f_{kl}$ : 링크 유형  $t \in \{h, s\}$  인 링크  $(k, l)$ 의 최적 운행빈도  
 $f_{kl}^{max}$ : 링크  $(k, l)$ 의 최대 운행빈도  
 $v_{ij}^t$ : 링크 유형  $t \in \{h, s\}$  인 링크  $(i, j)$ 의 수송수단 속도  
 $K_{ij}^{max}$ : 링크  $(i, j)$ 를 운행하는 수송수단의 최대 수송 규모

## 감사의 글

이 논문은 2006년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2006-214-D00205).

## 참고문헌

- 윤문길(2000) 단일 연결계약 하의 설비입지를 고려한 망설계문제의 쌍대기반 해법. **한국경영과학회지**, 한국경영과학회, 제25권, 제1호, pp. 67-84.  
 정승주(2003) 철도화물운송을 위한 Hub-and-Spokes 서비스 네트워크 디자인 모형의 개발. **대한교통학회 제43회 학술발표회**, 대한교통학회, pp. 75-93.  
 Aykin, T. (1994) Lagrangian relaxation based approaches to capacitated hub-and-spoke network design problem. *European Journal of Operational Research*, Vol. 79, No. 3, pp. 501-523.  
 Aykin, T. (1995) Networking policies for hub-and-spoke systems with application to the air transportation system. *Transportation Science*, Vol. 29, No. 3, pp. 201-221.  
 Bostel, N. and Dejax, P. (1998) Models and algorithms for container allocation problems on trains in a rapid transshipment shunting yard. *Transportation Science*, Vol. 32, No. 4, pp. 370-379.  
 Campbell, J. F. (1994) Integer programming formulations of discrete hub location problems. *European Journal of Operational Research*, Vol. 72, No. 2, pp. 387-405.  
 Cao, B. and Uebe, G. (1993) An algorithm for solving capacitated multicommodity p-median transportation problems. *The Journal of the Operational Research Society*, Vol. 44, No. 3, pp. 259-269.  
 Crainic, T. G., Ferland, J.-A., and Rousseau, J.-M. (1984) A tactical planning model for rail freight transportation. *Transportation Science*, Vol. 18, No. 2, pp. 165-184.  
 Klineciewicz, J. G. (2002) Enumeration and search procedures for a hub location problem with economies of scale. *Annals of Operations Research*, Vol. 110, No. 1-4, pp. 107-122.  
 Ozan, E. (2000) Optimising container transfers at multimodal ter-

- minals, *Mathematical and Computer Modelling*, Vol. 31, No. 10-12, pp. 235-243.
- O'Kelly, M. E. (1986) The location of interacting hub facilities. *Transportation Science*, Vol. 20, No. 2, pp. 92-106.
- O'Kelly, M. E. (1987) A quadratic integer program for the location of interacting hub facilities. *European Journal of Operational Research*, Vol. 32, No. 3, pp. 393-404.
- O'Kelly, M. E. and Bryan, D. L. (1998) Hub location with flow economies of scale. *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 32, No. 8, pp. 605-616.
- Racunica, I. and Wynter, L. (2005) Optimal location of intermodal freight hubs. *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 39, No. 5, pp. 453-477.
- (접수일: 2006.3.3/심사일: 2006.5.11/심사완료일: 2006.10.4)