

■ 論 文 ■

## 규모의 경제효과를 고려한 도로화물수송의 비제약 허브네트워크 설계

A Non-strict Hub Network Design for Road Freight Transportation  
considering Economies of Scale

**김 남 주**

(경기도시공사 도시정책연구소 책임연구원)

**고 승 영**

(서울대학교 건설환경공학부 교수)

**김 용 진**

(인하대학교 아태물류학부 조교수)

**전 경 수**

(서울대학교 건설환경공학부 교수)

### 목 차

- |  |   |
|--|---|
| <p>I. 서론</p> <p>II. 기존연구 검토</p> <p style="margin-left: 20px;">1. 일반적인 허브네트워크 설계 연구</p> <p style="margin-left: 20px;">2. 네트워크를 고려한 허브네트워크 설계 연구</p> <p style="margin-left: 20px;">3. Hornor and O'Kelly (2001)의 연구</p> <p>III. 모형개발</p> <p style="margin-left: 20px;">1. 수송비용과 할인율의 이론적 관계 고찰</p> | <p style="margin-left: 20px;">2. 비제약 허브네트워크 모형 설계</p> <p style="margin-left: 20px;">3. 알고리즘</p> <p>IV. 사례 분석</p> <p style="margin-left: 20px;">1. 분석자료 구축</p> <p style="margin-left: 20px;">2. 분석결과</p> <p>V. 결론 및 향후과제</p> <p>참고문헌</p> |
|--|---|

**Key Words :** 도로화물수송, 허브네트워크, 물류, 규모의 경제, 할인율  
road freight transportation, hub network design, logistics, economies of scale, discount

### 요 약

허브네트워크 설계는 네트워크 내에 전환점 역할을 수행하는 허브를 건설하여 허브에서의 분류, 환적, 집화 등의 과정을 통한 규모의 경제효과로 네트워크의 물류비용을 줄이는 물류정책과정이다. 이는 일반적으로 물류비용을 최소화하기 위한 최적 허브수 및 입지, 그리고 최적 수송경로를 결정하는 것이 목적으로 허브정책, 허브입지, 비허브의 허브할당, 할인율 등의 특성으로 인하여 최적해의 도출이 어려운 NP-Hard문제이다.

본 연구에서는 기 형성된 네트워크 구조에서 수송량 증가에 따른 규모의 경제효과로서 나타나는 비용할인을 반영할 수 있는 Hornor and O'Kelly (2001)를 살펴보고, 이를 근간으로 우리나라 전국 도로네트워크를 대상으로 할인율에 따른 허브가능입지 및 수송경로 변화를 검토하였다.

본 연구는 링크중심의 도로네트워크 경로탐색과 같은 공학적인 접근을 통하여 대규모 도로네트워크와 수송자료를 이용하여 합리적인 시간 내에 최적해를 도출할 수 있는 방법론을 적용하여 우리나라에 적합한 허브네트워크를 제시한다는 점에서 의의가 있다. 나아가, 글로벌 경쟁화로 인한 범세계적 물류 네트워크에서 물류비용절감을 통해 국가경쟁력을 확보하도록 하는 화물정책적 측면에서 기여할 것으로 판단된다.

Implementing hub networks in logistics is generally attractive and effective because of cost savings derived from economies of scale on network transportation, and objective of the hub network design problem is to decide optimal hub locations, and the transportation route of each origin-destination pair. This problem is generally a NP-complete problem not to solve easily, and it is almost impossible to find optimal solutions considering the big-sized network within a reasonable time.

This research tried to find optimal logistics strategy in the given big-sized real network and the freight origin-destination data. The objective function, which was proposed by Honor and O'Kelly (2001), that rewards economies of scale on network links with increase of transportation volumes, is applied.

This thesis proposed the optimal hub network of Korea within a reasonable time based on engineering approaches. And it is expected that this thesis can contribute to plan freight policies which can improve to have competitive power in the level of a company or nation by reducing logistic costs.

## I. 서론

허브네트워크(hub network)는 네트워크 내에 전환점(switching point) 역할을 수행하는 허브를 건설하여 기종점별 수송량을 허브에서 목적지별로 분류하여 서로 다른 기점에서 출발한 화물을 또 다른 허브나 최종목적지로 수송하는 물류정책이다. 즉, 개별 기점에서 개별 종점으로 수송되는 화물을 허브에서의 분류, 환적, 집화 등의 과정을 통한 규모의 경제효과로 네트워크의 물류비용을 줄이고자 하는 것이다.

허브네트워크 설계 문제는 네트워크 내의 총 물류비용을 최소화하기 위한 최적의 허브수 및 허브입지, 그리고 최적 수송경로를 결정하는 것이 목적이다. 지금까지의 수많은 연구에서 허브네트워크 설계와 관련하여 허브입지 선정방법, 허브정책에 따른 비허브의 허브할당방법, 할인율, 모형의 풀이방법 등 여러 가지 측면에서 이를 개발하고 발전시켰다.

그러나 대부분의 기존연구들은 항공, 통신 등과 같이 수송경로의 선택이 자유롭거나 신도시의 간선 및 지선 교통망 건설과 같이 네트워크가 갖추어져 있지 않은 경우에 적합한 모형으로 현실의 도로수송과 같이 기 건설된 네트워크를 이용하는 수송문제에는 적합하지 않다. 따라서 기존에 건설되어 있는 네트워크를 고려할 수 있는 허브네트워크 설계 연구가 필요하다.

또한 대부분의 기존연구들은 합리적인 시간 내에 해를 도출하기 어려운 허브네트워크 설계 문제의 NP-Hard 특성으로 인하여 아주 적은 수의 기종점을 대상으로 하여 수행되었다. 하지만 현실에서의 물류는 몇몇 지역이 아닌 수많은 지역간의 상호교류로 이루어지며, 따라서 보다 대규모 네트워크에서 합리적인 시간 내에 허브네트워크 설계 문제를 해결할 수 있는 접근방법이 모색되어야 한다.

수많은 허브네트워크 설계 연구 중 Hornor and O'Kelly (2001)는 네트워크 구조에서 허브간 수송만이 아닌 모든 수송에서 있어 비용할인효과가 발생하도록 모형을 설계하여 제시하였으며, 본 연구에서는 이를 국내 화물수송의 대부분을 차지하고 있는 도로네트워크에 적용하였다.

본 연구는 비용효율적인 경우에만 허브를 통해 수송하는 비계약 허브네트워크 설계를 대상으로 하며, 수송량 증가로 인한 규모의 경제효과는 허브간 수송만이 아닌 모든 수송에 반영하였다.

## II. 기존연구 검토

### 1. 일반적인 허브네트워크 설계 연구

허브의 입지선정과 기종점간 수송의 상호작용을 고려한 수송경로선택의 허브네트워크 설계 연구는 시스템의 비용을 최소화하는 허브입지와 수송패턴을 동시에 결정한 O'Kelly (1986)에 의해 처음으로 체계화되었다. 이 연구는 단일할당 1~2개 허브입지에 대하여 노드간 수송거리를 비용함수로 설정하였고, 부등식을 이용하여 허브수가 1개와 2개인 경우에 대한 최적 허브네트워크를 설계하였다. 이중 허브수가 2개인 경우 허브간 수송에 있어 규모의 경제효과를 반영하기 위한 비용할인인자를 추가적으로 고려하여 반영하였다.

O'Kelly (1987)는 노드의 허브할당을 정수 변수로 표현하는 이차정수모형(quadratic integer program)을 사용하여 p개 허브입지문제로 개선시켰다. 이 연구는 허브수를 미리 결정하였고 비허브가 한 개의 허브에만 연결되도록 하는 단일할당(single allocation)문제로서 할인효과를 고려한 허브간 수송비용과 비허브-허브간 수송비용의 합을 모형화하여 다수의 허브입지를 선정할 수 있는 두 가지 휴리스틱 방법(HEUR1, HEUR2)을 제시하였다.

Klincewicz (1991)는 허브노드 중 1~2개를 비허브노드와 교환하여 최적화시키는 single or double exchange heuristic, 노드좌표와 발생·도착량의 합을 고려하여 일차적으로 허브노드를 결정하는 clustering heuristic, 거리와 수송량을 동시에 고려하는 허브할당방법인 multi-criteria assignment procedure를 제시하였다.

Skorin-Kopov et al. (1994)은 용량계약이 없는 단일할당 p개 허브입지문제에 대하여 허브입지선정과 거리기반의 허브할당과정을 동시에 결정하는 TABUHUB를 제안하였다.

Campbell (1994)은 수송비용을 최소화하는 일반적인 p개 허브입지문제를 포함한 4가지 이산형 허브입지문제의 정수계획모형을 제시하였으며, 비허브가 하나 이상의 허브에 연결될 수 있는 다중할당(multiple allocation)문제의 모형을 설계하였다.

Aykin (1994, 1995)은 직송이 가능하고 비용효율적인 경우에만 허브를 통해 수송하는 비계약허브정책(nonstrict hubbing policy)과 직결수송을 고려하지 않고 허브를 통

해서만 수송하는 제약허브정책(strict hubbing policy)의 두 가지 네트워크정책(network policy)을 제시하였다.

Jaillet et al. (1996)은 유형별 항공수단 용량제약을 고려하는 다중할당 항공네트워크 설계 문제에서 one-stop, two-stop, all-stop의 3가지 경우에 대한 정수선형계획법을 제시하였다.

Skorin-Kopov et al. (1996)은 O'Kelly (1987)와 Campbell (1994)의 용량제약이 없는 단일할당 및 다중할당의 p개 허브입지결정모형에 선형계획완화와 정수계약조건을 고려하여 계산량을 줄이며 보다 최적해를 탐색하였다.

Campbell (1996)은 다중할당방법이 단일할당 방법보다 자유도가 높아 계산이 간단하고 네트워크 총 수송비용도 작아 단일할당 허브입지문제의 하한을 제공할 수 있다는 점에 착안하여, 다중할당문제의 최적해를 단일할당문제의 초기해로 사용하였다.

O'Kelly and Bryan (1998)은 허브간 할인율이 수송규모와 관계없이 단일상수로 가정되어 모든 허브간 링크에 적용되는 이제까지의 허브입지모형(HUBLOC)이 과도하게 단순화되어 있음을 지적하고, 허브간 수송량 규모에 따라 할인율이 변화하는 모형(FLOWLOC)을 제시하였다.

김동규 (2006)는 O'Kelly (1987)의 연구를 수송빈도와 서비스지체의 합을 최소화시키는 정승주 (2003)를 이용하여 재고비용, 처리비용, 링크건설비용, 서비스지체비용을 목적함수에 포함시켜 분석하였으며, 홍영채 (2007)는 이를 tabu search, tabu search after pre-analysis 등의 방법으로 비교·제시하였다.

## 2. 네트워크를 고려한 허브네트워크 설계 연구

이금숙과 강승필 (1990)은 화물수요, 운임 등을 고려하여 도로/철도 네트워크에서 복합화물 터미널의 최적입지를 선정하였다. 이 연구는 입지선정을 위한 수학적 계획모형을 제시하고 이를 적용하였다는 점에 의의가 있으나, 복합화물 터미널의 입지가 5개로 제한되어 있고, 화물수송에 있어서의 규모의 경제효과를 고려하지 않았다.

Taniguchi et al. (1999)은 고속도로와 일반도로가 구분된 오사카와 교토지역 도로네트워크를 대상으로 교통상황을 고려한 물류터미널의 최적 입지를 선정하였으며, 이는 일반적으로 대도시권과 가까운 고속도로와 일반도로의 연결점이라 하였다.

Jourquin and Beuthe (1996), Boile (2000), Southworth and Peterson (2000) 등은 GIS프로그램을 이용하여 복합수단 네트워크에서의 최적 수송경로를 제시하고자 하였다.

정승주 (2003)는 Jaillet et al. (1996)의 연구를 근간으로 유럽의 철도 네트워크를 대상으로 하여 최적 허브입지 선정과 구간 및 빈도, 수송루트를 결정하는 철도 서비스 네트워크 설계 모형을 제시하였다. 즉, 수송비용, 터미널 처리비용을 포함하는 경로운영비용과 열차속도에 따른 지체비용, 터미널 화물취급 지체비용, 서비스 빈도에 따른 지체비용을 포함하는 시간지체비용으로 목적함수를 구성하여 통과물량이 많은 노드를 허브가능입지로 선정하였다.

Arnold et al. (2004)은 도로와 철도가 결합된 네트워크를 대상으로 하여 전체 수송비용을 최소로 하는 화물터미널 입지를 선정하였다. 이 연구에서는 기존연구가 허브를 노드로 고려한 것과는 달리 허브를 링크로 전환시켜 변수의 수를 줄임으로써 현실의 대규모 네트워크에서 분석이 수월하도록 구성하였으며, 용량제약과 규모의 경제효과를 고려하지 않은 상태에서 최단경로로 수송하여 최적 수단분담율을 도출하였다. 비용함수는 수송비용과 허브에서의 환적비용을 고려하였다.

## 3. Hornor and O'Kelly (2001)의 연구

네트워크를 고려한 여러 허브네트워크 설계 연구 중 Hornor and O'Kelly (2001)는 규모의 경제효과로 인하여 수송비용이 수송량증가에 따라 비선형으로 감소한다는 점에 착안하여 통상적인 통행배정과정에서 사용되는 BPR식을 이용하여 수송량에 따른 규모의 경제효과에 의하여 발생하는 비용절감을 반영할 수 있는 할인율의 모형식을 구성하였다.

즉 식(1)의 BPR식에서 수송량증가에 따라 수송비용을 증가시키는 통행저항  $P_l$ 의 부호를 음(-)으로 바꾸어 식(2)와 같이 수송량증가에 따라 비용이 줄어들도록 할인인자  $D_l$ 을 모형화하였다.

$$P_l = \left(1 + \theta \left(\frac{x_l}{K_l}\right)^\beta\right) \quad (1)$$

$$D_l = \left(1 - \theta \left(\frac{x_l}{K_l}\right)^\beta\right) \quad (2)$$

여기서,  $P_l$  : BPR 모형식  
 $D_l$  : 할인인자 모형식  
 $x_l$  : 링크의 수송량  
 $K_l$  : 링크의 용량  
 $\theta, \beta$  : 파라메터

목적함수는 위에서 모형화한 비선형 할인율을 적용하여 네트워크 총 수송비용을 최소화하도록 목적함수를 구축하였다.

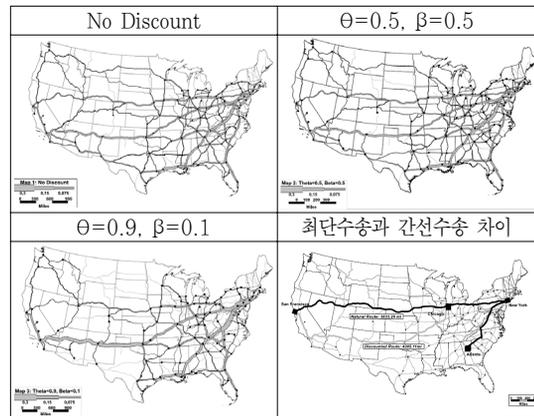
$$MIN(Z) \quad Z = \sum_l x_l C_l(x_l) \tag{3}$$

$$C_l(x_l) = (1 - \theta x_l^\beta) \zeta \tag{4}$$

<표 1> Hornor and O’kelly (2001)의 분석결과

$\theta$	$\beta$	평균 수송거리	평균 수송비용	$\theta$	$\beta$	평균 수송거리	평균 수송비용
0.25	1.0	1146.710	1137.898	0.50	1.0	1146.811	1128.887
	0.9	1146.755	1134.391		0.9	1146.813	1121.919
	0.8	1146.758	1129.509		0.8	1146.857	1112.081
	0.7	1146.811	1122.567		0.7	1147.322	1197.665
	0.6	1146.813	1112.781		0.6	1147.499	1077.769
	0.5	1146.882	1098.788		0.5	1147.763	1049.416
	0.4	1147.037	1078.724		0.4	1148.093	1009.054
	0.3	1147.313	1049.904		0.3	1148.843	951.154
	0.2	1147.344	1008.482		0.2	1150.048	867.826
0.1	1147.052	948.405	0.1	1148.518	748.736		
0.75	1	1146.913	1119.913	0.90	1	1147.07	1114.16
	0.9	1147.144	1109.011		0.9	1147.372	1101.034
	0.8	1147.396	1093.001		0.8	1147.535	1082.885
	0.7	1147.593	1072.514		0.7	1147.923	1057.485
	0.6	1148.055	1042.294		0.6	1149.617	1019.598
	0.5	1149.674	998.415		0.5	1151.342	966.813
	0.4	1151.579	936.308		0.4	1155.754	888.485
	0.3	1155.663	845.738		0.3	1170.744	773.744
	0.2	1157.759	721.079		0.2	1190.7	615.335
0.1	1156.343	544.289	0.1	1197.407	407.678		

주: 최대반복회수 500, 수렴조건 0.0001



<그림 1> Hornor and O’kelly (2001)의 분석결과

여기서,  $l$  : 네트워크의 링크  
 $x_l$  : 링크  $l$ 의 수송량 (네트워크 총수송량에 대하여 환산된 값임, 즉  $\sum x_l = 1$ )  
 $C_l(x_l)$ : 링크  $l$ 의 수송비용  
 $\zeta$  : 링크  $l$ 의 길이  
 $\theta, \beta$  : 할인율의 파라메터

그리고 기중점간 수송수요를 위의 목적함수를 이용하여 네트워크에 배정하여 최적 수송경로를 도출하였다. 배정 결과 도출되는 네트워크 수송수요경로를 분석하여 시각적으로 수송이 밀집되는 지점을 허브가능입지로 고려하였다.

이와 같은 Hornor and O’kelly (2001)의 연구는 비제약허브정책 하에서 모든 링크에 비용할인을 적용하여 수송수요를 배정하여 시각적으로 수송이 밀집되는 지점을 허브가능입지로 제시하는 방법으로 일반적인 허브 네트워크 설계모형 연구와 같이 외생적으로 허브의 수와 입지를 결정하지 않는다.

Hornor and O’kelly (2001)는 할인율 파라메터  $\beta$ 가 작아질수록,  $\theta$ 가 커질수록 수송이 집중되며, 이에 따른 우회수송의 증가로 평균수송거리는 증가하는 반면 평균수송비용은 감소한다고 하였다. 또한 모형을 통한 주 수송경로는 기중점간 최단경로가 아닌 비용최소화경로로 우회수송되며, 이는 현실의 간선수송경로와 유사하다고 하였다. 이상의 내용은 <표 1> 및 <그림 1>과 같다.

### III. 모형개발

#### 1. 수송비용과 할인율의 이론적 관계 고찰

집적수송으로 인한 규모의 경제효과는 허브네트워크

설계의 핵심이다. 모형에서 수송량증가에 따라 수송비용이 절감되는 규모의 경제효과는 할인율의 개념을 통해 반영되며, 이는 수송량과 관계없이 일정한 값이 적용되는 상수할인율과 수송량이 증가함에 따라 높은 할인율이 적용되는 가변할인율로 구분된다.

$$\Omega = \sum_q \sum_r (\alpha \times c_t \times W_{qr} \times X_{q r k m}) \quad (5)$$

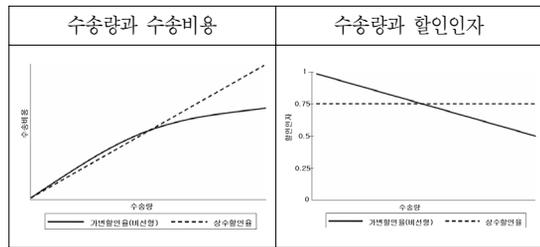
$$\alpha = 1 - d \approx 1 - \theta \left( \frac{\sum_i \sum_j W_{ij} X_{ijk m}}{\sum_i \sum_j W_{ij}} \right)^\beta \quad (6)$$

여기서,  $\Omega$  : 수송비용(transportation cost)  
 $d$  : 할인율(discount)  
 $\alpha$  : 할인인자(discount factor)  
 $c_t$  : 단위수송량 단위거리 당 수송비용  
 $W_{qr}$  : 노드  $q$ 에서 노드  $r$ 로의 수송량  
 $X_{q r k m}$  : 노드  $q$ 에서 노드  $r$ 로의 수송 중 허브  $k$ 와  $m$ 을 통과하는 수송이면 1, 그렇지 않으면 0  
 $\sum_i \sum_j W_{ij} X_{ijk m}$  : 허브간 링크( $k, m$ )의 총 수송량  
 $\sum_i \sum_j W_{ij}$  : 네트워크 총 수송량  
 $\theta, \beta$  : 파라미터 ( $\theta \geq 0, \beta \geq 0$ )

즉, 할인율(discount)이 커질수록 실질적으로 모형에 적용되는 할인인자(discount factor)는 감소하며, 결과적으로 수송비용(transportation cost)은 감소하게 된다. 예를 들어 상수할인율이 0.25라면 모형에 적용되는 할인인자는 0.75로서 수송비용이 25% 절감되는 것이며, 가변할인율이 수송량 증가에 따라 0에서 0.25로 증가하면, 할인인자의 크기는 1에서 0.75로 감소하며 수송비용은 25% 절감되는 것이다.

이상의 내용을 검토하면 할인율과 할인인자의 합은 1로, 각각은 0과 1사이의 값을 가지게 되며, 할인율은 상수 또는 비선형의 함수로 고려될 수 있다. 가변할인율을 적용할 경우 수송비용은 오목함수(concave function)로 구현되며, 1차 미분값은 양수로, 2차 미분값은 음수로 나타난다.

$$\alpha + d = 1 \quad (7)$$



〈그림 2〉 수송량에 따른 수송비용과 할인인자의 변화

$$0 \leq \alpha \leq 1, 0 \leq d \leq 1 \quad (8)$$

$$\frac{d\Omega}{dW_{ij}} > 0, \frac{d^2\Omega}{dW_{ij}^2} < 0 \quad (9)$$

여기서,  $\alpha$  : 할인인자(discount factor)  
 $d$  : 할인율(discount)  
 $\Omega$  : 수송비용(transportation cost)  
 $W_{ij}$  : 노드  $i$ 에서 노드  $j$ 로의 수송량

## 2. 비제약 허브네트워크 모형 설계

본 연구에서는 집적수송의 규모의 경제효과를 고려할 수 있는 Hornor and O'Kelly (2001)의 연구를 적용하여 할인율이 수송량에 따라 비선형으로 결정되도록 하였다.

비제약 허브네트워크 설계를 위하여 우선, 기중점 수요  $W_{ij}$ 를 수송수요의 총합으로 나누어  $W_{ij}^*$ 를 다음과 같이 산출한다.

$$W_{ij}^* = \frac{W_{ij}}{\sum_i \sum_j W_{ij}} \quad \forall (i, j) \quad \left( \sum_{i, j} W_{ij}^* = 1 \right) \quad (10)$$

여기서,  $W_{ij}$  : 기점  $i$ 에서 종점  $j$ 로의 수송량  
 $W_{ij}^*$  : 기점  $i$ 에서 종점  $j$ 로의 변환된 수송량

이와 같은 기중점수요  $W_{ij}^*$ 는 통행배정과정을 통해 네트워크 내 링크수송량  $x_i$ 를 산출한다. 이 때 네트워크 내의 한 링크에  $W_{ij}^*$ 가 전량 배정되면  $x_i$ 는 1이 되며, 링크에 배정되지 않으면 0이 된다. 즉, 링크의 용량  $K_i$ 는 1로 간주할 수 있으며, 이는 본 모형이 링크의 용량제약을

고려하지 않음을 의미한다. 링크의 용량  $K_l$ 을 1로 설정하여 식을 정리하면 다음과 같다.

$$D_l = (1 - \theta x_l^\beta) \tag{11}$$

여기서,  $D_l$  : 할인인자 모형식  
 $x_l$  : 링크  $l$ 의 수송량  
 $\theta, \beta$  : 파라미터

링크수송비용은 할인인자에 링크수송량과 링크길이를 곱하여 산출하며 다음과 같다.

$$F^*(x_l) = (1 - \theta x_l^\beta) x_l L_l \tag{12}$$

여기서,  $F^*(x_l)$  : 수송량  $x_l$ 에 대한 링크수송비용  
 $x_l$  : 링크  $l$ 의 수송량  
 $L_l$  : 링크  $l$ 의 길이  
 $\theta, \beta$  : 파라미터

비록 수송량의 함수인 할인인자  $D_l$ 이 수송량이 증가할수록 비선형으로 감소하지만, 링크수송비용  $F$ 는 증가해야 한다. 이를 위해서는 링크수송비용의 1차 미분값이 음의 값을 갖지 않아야 하며, 파라미터  $\theta$ 와  $\beta$ 의 조합은 아래의 조건을 만족시켜야 한다.

$$\frac{dF^*}{dx} = (1 - \theta(\beta + 1)x_l^\beta) L_l \geq 0 \tag{13}$$

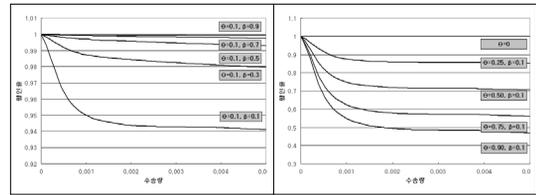
$$1 - \theta(\beta + 1)x_l^\beta \geq 0 \tag{14}$$

$$(\beta + 1)x_l^\beta \leq \frac{1}{\theta} \tag{15}$$

여기서 수송량이 최대인 경우, 즉  $x_l$ 이 1인 경우를 고려하면 할인율 파라미터의 조합은 다음의 조건을 만족해야 한다.

$$(\beta + 1) \leq \frac{1}{\theta} \tag{16}$$

그러나 링크 수송량  $x_l$ 은 일반적으로 아주 작은 값을 가지게 되며, 따라서  $\beta$ 는 식(16)의 조건보다 큰 값을 가질



〈그림 3〉 파라미터에 따른 할인율 변화

수 있게 된다. 본 연구에서는  $\theta$ 가 0인 경우를 미시행(Do-nothing)의 경우로 설정하고,  $\theta$ 를 0.25, 0.50, 0.75로,  $\beta$ 의 값을 0.1~1.0에서 0.1씩 증가시켜 분석하였다.

〈그림 3〉은 파라미터 크기에 따른 할인율의 변화 정도를 보여주는 것으로, 왼쪽 그림은  $\theta$ 가 0.1이고  $\beta$ 가 0.1~0.9인 경우, 오른쪽 그림은  $\beta$ 가 0.1이고  $\theta$ 가 0~0.9인 경우 할인율의 변화를 보여준다. 이를 살펴보면,  $\theta$ 가 크고  $\beta$ 가 작을수록 수송량에 대하여 변화율이 큰 것으로 나타나며, 두 파라미터 중  $\theta$ 에 대한 민감도가 더 큰 것으로 나타난다. 또한  $\theta$ 가 0인 경우는 수송량 증가에 대한 링크비용할인이 없는 것을,  $\theta$ 가 1인 경우는 수송량 증가와 관계없이 링크비용은 0임을 의미한다.

본 연구의 목적함수는 Hornor and O'Kelly (2001)를 적용하여 다음과 같이 구성하였다.

$$MIN(Z) \quad Z = \sum_l (1 - \theta x_l^\beta) x_l L_l \tag{17}$$

여기서,  $l$  : 네트워크의 링크  
 $x_l$  : 링크  $l$ 의 수송량  
 $L_l$  : 링크  $l$ 의 길이  
 $\theta, \beta$  : 할인율의 파라미터

### 3. 알고리즘

본 연구에서 기중점별 수송경로 결정은 도시 및 지역 교통계획을 수행함에 있어 범용적으로 사용되는 EMME/2를 사용하였다. 이는 교통계획측면에서 화물수송의 규모의 경제효과를 고려하여 대규모 도로네트워크에서의 수송패턴을 결정하고자 한 것이다. 다만, 수송의 규모의 경제효과에 따른 실질할인율의 추정은 그 자체가 연구과제로서, 수송링크가 구축되어 있는 대규모 기존 네트워크에서 물류비용을 최소화하기 위한 허브네트워크 설계와는 다르므로, 통행저항함수로 사용되는 BPR식을 식(12)와 같이 변환하

여 사용하였다.

구체적으로 EMME/2에서 할인을 파라미터를 변화시키거나 도로화물수송 허브네트워크를 시뮬레이션하였으며, 수송거리, 수송비용, 그리고 수송패턴을 분석하여, 할인율에 따른 허브네트워크의 변화와 허브가능입지를 살펴보았다.

이와 같은 분석방법은 화물이 개별화주에 의하여 운송되어지는 사용자 평형(UE)을 가정할 것으로, 전 네트워크의 수송비용을 최소화하는 시스템 최적화(SO) 결과를 제시하지는 않는다. 그러나 분석범위가 우리나라 전체와 같은 거시적 수준이며, 또한 대규모 도로네트워크에서의 시스템 최적화는 현실적으로 불가능하다는 것을 감안할 때 본 연구는 물류설계측면에서 의미가 있을 것으로 판단된다.

#### IV. 사례분석

##### 1. 분석자료 구축

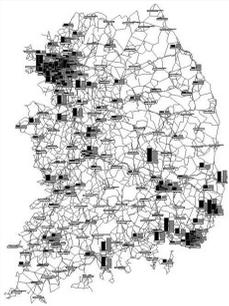
본 연구는 네트워크와 수송수요 자료가 주어진 상태에서 최적 허브네트워크를 설계하는 것으로 기초자료인 네트워크와 수송수요가 어떻게 구성되는가에 따라 분석 결과는 다르게 도출될 것이다. 예를 들어 농수산물, 전자제품, 귀금속류 중 어떤 화물품목을 수송하는가에 따라 또한, 독자적인 수송망과 유통시설을 이용하는 자가물류인가 물류업무를 아웃소싱하는 제3자물류인가에 따라 다른 수송패턴을 보일 것이다.

본 연구에서는 별도의 세분화된 자료 구축이 어려우므로 대규모 현실 도로네트워크 및 수송자료를 이용한 전략적·거시적 수준에서의 허브네트워크 설계라는 본 연구 목적에 부합되도록 한국교통연구원(KOTI)의 2004년 전국 총화물OD자료(톤/일)와 도로네트워크를 이용하였으며, 이를 적용한 결과는 본 연구의 적용방안에 대한 하나의 사례분석으로서 판단되어야한다.

수송비용 단가는 『2004 국가물류비 산정 및 추이 분석(2006.12)』을 적용하였다. 분석네트워크는 도서지역을 제외한 총 242개 존, 12,700개 노드와 36,454개 도로링크로서 다음과 같다.

##### 2. 분석결과

분석은 수송량 증가에 따른 비용할인이 없는 경우( $\theta = 0$ )를 기본으로 하여, 비용할인이 발생하는 경우  $\theta$ 는

	존수	242
	노드수	12,700
	링크수	36,454
	총OD쌍의 수	57,853
	총수송량 (톤/일)	3,728,334
	도로수송비용 (원/톤·km)	545.1

자료: 한국교통연구원 전국 총화물OD자료  
주: 그림의 막대는 왼쪽은 존별 화물 발생량을 오른쪽은 도착량을 의미

〈그림 4〉 분석 네트워크 및 수송자료 패턴

0.25, 0.50, 0.75, 0.9로,  $\beta$ 는 0.1에서 1.0까지 구분하여 총 41개의 시나리오에 대한 허브네트워크 시뮬레이션을 수행하였다.

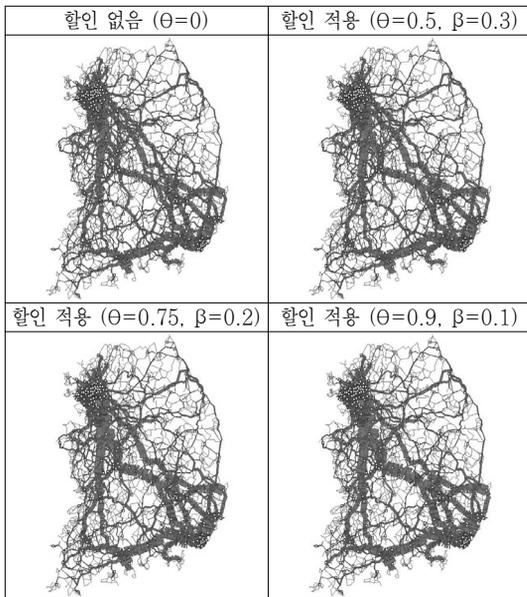
분석결과 〈표 2〉와 같이 수송량에 대한 할인율의 변화가 클수록, 즉  $\theta$ 가 크고  $\beta$ 가 작을수록 네트워크의 수송거리가 길어지며 수송비용이 감소하였다. 또한 〈그림 5〉와 같이 수송량 증가에 대한 비용할인이 커질수록 수송의 간선축인 경부축에 수송량 집중현상이 두드러지게 나타났다.

이는 국내 도로네트워크와 수송수요를 적용한 허브네트워크 시뮬레이션 결과 또한 Hornor and O'Kelly (2001)의 연구와 동일한 결과를 나타내는 것으로, 수송

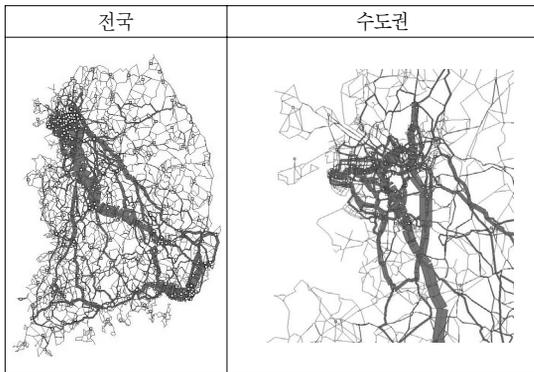
〈표 2〉 할인율 시나리오에 따른 시뮬레이션 결과

$\theta$	$\beta$	수송거리 (백만km)	수송비용 (억원)	비용감소 (%)	$\theta$	$\beta$	수송거리 (백만km)	수송비용 (억원)	비용감소 (%)
0	-	264.56	1442.14	-					
0.25	1.0	264.56	1440.30	-0.13	0.75	1.0	264.57	1436.60	-0.38
	0.9	264.56	1439.11	-0.21		0.9	264.57	1432.94	-0.64
	0.8	264.57	1437.11	-0.35		0.8	264.58	1426.81	-1.06
	0.7	264.57	1433.74	-0.58		0.7	264.61	1416.47	-1.78
	0.6	264.57	1428.04	-0.98		0.6	264.68	1398.66	-3.01
	0.5	264.59	1418.31	-1.65		0.5	264.84	1368.16	-5.13
	0.4	264.61	1401.66	-2.81		0.4	265.06	1316.28	-8.73
	0.3	264.66	1372.81	-4.81		0.3	265.55	1226.56	-14.95
	0.2	264.67	1323.12	-8.25		0.2	266.30	1072.96	-25.60
	0.1	264.67	1236.11	-14.29		0.1	266.86	812.28	-43.68
0.50	1	264.57	1438.45	-0.26	0.90	1	264.57	1435.46	-0.46
	0.9	264.57	1436.05	-0.42		0.9	264.58	1431.06	-0.77
	0.8	264.57	1432.00	-0.70		0.8	264.59	1423.68	-1.28
	0.7	264.59	1425.14	-1.18		0.7	264.62	1411.18	-2.15
	0.6	264.62	1413.54	-1.98		0.6	264.75	1389.47	-3.65
	0.5	264.64	1393.89	-3.35		0.5	264.92	1352.69	-6.20
	0.4	264.79	1359.64	-5.72		0.4	265.02	1291.20	-10.47
	0.3	264.94	1301.26	-9.77		0.3	266.14	1179.47	-18.21
	0.2	265.19	1200.57	-16.75		0.2	267.35	993.62	-31.10
	0.1	264.99	1027.81	-28.73		0.1	268.74	679.18	-52.90

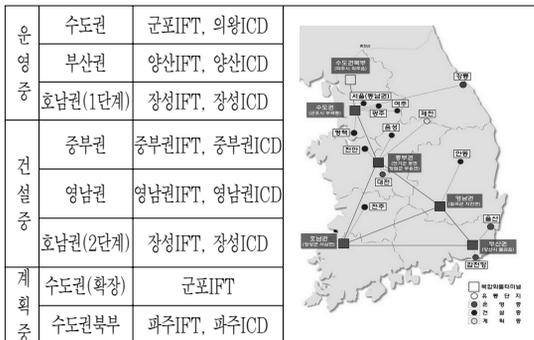
주: 최대반복회수 500, 수렴조건 0.0001



〈그림 5〉 할인율 파라미터에 따른 시뮬레이션 결과



〈그림 6〉 전국 및 수도권 화물수송 집중도



주 : 구분에서 IFT는 복합화물터미널(Integrated Freight Terminal)을, ICD는 내륙컨테이너기지(Inland Container Depot)를 나타냄.  
 자료 : 건설교통부, 2007. 01

〈그림 7〉 내륙화물기지 건설현황 및 배치도

에 있어 할인율이 적용되는 경우 네트워크 수송비용의 최소화를 위한 우회수송의 증가로 수송의 간선축에 보다 많은 수송량이 집중되는 것을 보여준다.

또한 네트워크의 허브가능입지를 알아보기 위하여 할인율에 따른 시뮬레이션 결과 중 높은 할인율 시나리오( $\theta=0.9, \beta=0.1$ )와 비용할인이 없는 시나리오( $\theta=0$ )의 시뮬레이션 결과 배정된 수송량 차이를 〈그림 6〉과 같이 도시해보았다. 그 결과 수도권은 인천 및 경기도 양주 일대, 의왕/성남/광주 또는 오산/평택/안성 일대에, 비수도권은 부산권, 천안권, 대전권, 대구권, 광양권 및 전주권과 광주권 등에 물류거점이 위치할 수 있는 것으로 나타났다.

본 연구는 허브가능입지를 추정한 것으로 앞서 언급한 바와 같이 정확한 허브입지 선정을 위해서는 외생변수 도입을 통한 계량분석이 필수적이다. 그러나 개략분석을 통한 허브가능입지를 쉽게 파악할 수 있으며, 허브네트워크 설계결과가 〈그림 7〉의 건교부 복합화물터미널 건설계획과 유사한 것은 의미가 있는 것으로 판단된다.

### V. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 대규모 현실 도로네트워크 및 수송자료를 이용하여 허브가능입지 및 기중점간 수송경로를 전략적이며 거시적인 관점에서 검토해 보았다. 이를 위해 수송량증가에 따른 비용절감효과를 반영할 수 있는 Hornor and O'Kelly (2001)의 연구를 적용하였다.

분석결과 수송에 있어 할인율이 적용되는 경우 네트워크 수송비용의 최소화를 위한 우회수송의 증가로 간선축에 보다 많은 수송량이 집중되었으며, 수도권은 인천 및 경기도 양주 일대, 의왕/성남/광주 또는 오산/평택/안성 일대에, 비수도권은 부산권, 천안권, 대전권, 대구권, 광양권 및 전주권과 광주권 등에 물류거점이 위치할 수 있는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 국내 도로네트워크와 수송수요를 적용한 허브네트워크 시뮬레이션 결과를 통해 수송에 있어 비용할인효과가 발생할 경우 비용 최소화를 위한 우회수송의 증가로 수송의 간선축에 보다 많은 수송량이 집중되는 것을 보였으며, 비교적 간단한 분석을 통하여 허브가능입지를 가늠해볼 수 있었다.

본 연구는 다음과 같은 의의를 가진다. 첫째, 링크중심의 허브네트워크 설계 모형을 적용하여 기존 도로네트워크에서의 허브가능입지와 최적 수송경로를 제시하였

다. 둘째, 네트워크 유형 및 규모, 수송수요 패턴과 상관 없이 분석이 가능하도록 분석과정의 전이성을 확보하였으며, 셋째, GIS프로그램을 이용한 공학적인 접근을 통하여 허브네트워크 설계 문제를 쉽게 분석할 수 있도록 하였다. 넷째, 현실 네트워크와 수송자료를 이용한 허브네트워크 설계로 국가물류비용을 절감을 통한 국가경쟁력을 확보하도록 하는 화물정책적인 측면에서 본 연구를 활용할 수 있을 것이다.

그러나 본 연구에서는 합리적인 시간내 해의 도출을 위하여 분석과정에서 참여주체, 수송품목, 수송수단, 비용요소 등을 단순화시켰으며, 보다 현실적인 분석을 위해서는 이에 대한 검토가 선행되어야 할 것이다. 우선 할인율에 대한 현실적인 검증작업을 통한 모형식과 파라미터의 설계가 필요하다. 실질적으로 본 연구에서 적용한 Hornor and O'Kelly (2001)는 분석결과 파라미터에 따라 다른 결과가 도출되며, 허브입지가 결정적으로 결정되는 것이 아니며, 수송링크가 자유류상태로 가정되어 링크의 용량제약을 고려하기 어렵다. 둘째, 비용할인효과가 허브간 수송에서만 발생하는지 허브-비허브, 비허브-비허브간에도 발생하는지에 대한 실증적 연구가 필요하다. 또한 화물품목별 특성을 반영할 수 있으며, 도로, 철도, 항공, 항만 등 다 수단 네트워크에서 적용가능한 허브네트워크 설계모형 개발이 필요하다. 마지막으로 이와 함께 본 연구에서 분석한 수송비용만이 아닌 허브건설비용과 허브운영비용, 그리고 허브에서의 환적비용 및 화물처리 비용 등을 목적함수에 반영하여야 할 것이며, 이와 같은 제약조건을 고려할 때 현실 물류특성을 고려한 실질적인 최적 허브네트워크를 설계할 수 있을 것이다.

**참고문헌**

1. 김동규(2006), "물류시스템 분석을 고려한 단일 할당 허브 네트워크 설계 모형 개발", 서울대학교 공학박사학위논문.
2. 이선숙·강승필(1990), "복합화물 터미널 입지선정을 위한 수학적 계획모형의 정립과 적용", 대한교통학회지, 제8권 제1호, 대한교통학회, pp.41~54.
3. 정승주(2003), "철도화물운송을 위한 Hub-and-spokes서비스네트워크 디자인모형의 개발", 제43회 학술발표회 발표집, 대한교통학회, pp.75~93.
4. 홍영채(2007), "허브 입지 문제의 휴리스틱 알고리즘에 관한 해석적 연구", 서울대학교 공학석사학

위논문.

5. 한국교통연구원(2006), "2004 국가물류비 산정 및 추이 분석".
6. Aykin, T.(1994), "Lagrangian relaxation based approaches to capacitated Hub-and-spoke network design problem", European Journal of Operational Research, 79(3), pp.501~523.
7. Aykin, T.(1995), "Networking policies for hub and spoke system with application to the air transportation system", Transportation Science, 29(3), pp.202~221.
8. Boile, M. P.(2000), "Intermodal transportation network analysis - A GIS application", 10th Mediterranean Electrotechnical Conference, MEleCon Vol.II, pp.660~663.
9. Bryan, D. L. and O'Kelly, M. E.(1999), "Hub-and-spoke networks in air transportation: an analytical review", Journal of regional science, 39(2), pp.275~295.
10. Campbell, J. F.(1994), "Integer programming formulations of discrete hub location problems", European Journal of Operational Research, 72, pp.387~405.
11. Campbell, J. F.(1996), "Hub location and the p-hub median problem", Operations Research, 44, pp.923~935.
12. Hornor, M. W. and O'Kelly, M. E.(2001), "Embedding economies of scale concepts for hub network design", Journal of Transport Geography, 9, pp.255~265.
13. Jaillet, P., Song, G. and Yu, G.(1996), "Airline network design and hub location problems", Location Science, 4(3), pp.195~212.
14. Jourquin, B. and Beuthe, M.(1996), "Transportation policy analysis with a geographic information system: The virtual network of freight transportation in Europe", Transportation Research Part C : Emerging Technologies, 4(6), pp.359~371.
15. Klincewicz, J. G.(1991), "Heuristics for the p-hub location problem", European Journal of

- Operational Research, 53, pp.25~37.
16. O'Kelly, M. E.(1986), "The location of interacting hub facilities", Transportation Science, 20(2), pp.92~106.
  17. O'Kelly, M. E.(1987), "A quadratic integer program for the location of interacting hub facilities", European Journal of Operational Research, 32(3), pp.393~404.
  18. O'Kelly, M. E. and Bryan, D. L.(1996), "Hub network design with single and multiple allocation: A computational study", Location Science, 4(3), pp.125~138.
  19. O'Kelly, M. E. and Bryan, D. L.(1998), "Hub location with flow economies of scale", Transportation Research Part B : Methodological, 32(8), pp.605~616.
  20. Skorin-Kapov, D. and Skorin-Kapov, J.(1994), "On tabu search for the location of interacting hub facilities", European Journal of Operational Research, 73, pp.502~509.
  21. Skorin-Kapov, D., Skorin-Kapov, J. and O'Kelly, M.(1996), "Tight linear programming relaxations of uncapacitated p-hub median problems", European Journal of Operational Research, 94, pp.582~593.
  22. Southworth, F. and Peterson, B. E.(2000), "Intermodal and international freight network modeling", Transportation Research Part C : Emerging Technologies, 8, pp.147~166.
  23. Taniguchi, E., Noritake, M., Yamada, T. and Izumitani, T.(1999), "Optimal size and location planning of public logistics terminals", Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review, 35(3), pp.207~222.

✉ 주 작성 자 : 김남주

✉ 교 신 저 자 : 김남주

✉ 논문투고일 : 2008. 5. 9

✉ 논문심사일 : 2008. 7. 10 (1차)

2008. 12. 11 (2차)

2008. 12. 15 (3차)

✉ 심사판정일 : 2008. 12. 15

✉ 반론접수기한 : 2009. 4. 31

✉ 3인 익명 심사필

✉ 1인 abstract 교정필