

■ 論 文 ■

교통물류거점의 네트워크 연계성 개선효과 분석 방법론  
A Methodology for Assessing the Network Connectivity Improvement for Transport Hubs

박 준 식  
(한국교통연구원 부연구위원)

강 성 철  
(한국교통연구원 부연구위원)

김 거 중  
(한국교통연구원 연구원)

목 차

- I. 서론
    - 1. 연구의 배경 및 목적
    - 2. 연구의 범위 및 내용
  - II. 기존연구 고찰
    - 1. 연계교통체계 분석
    - 2. 노드의 연계성 분석
  - III. 교통물류거점의 네트워크 연계성 개선효과 분석 방법론
    - 1. 노드의 연계성 산정 모형
    - 2. 공급연계성과 체감연계성
    - 3. 연계성 분석 대상 노드 설정
    - 4. 연계교통체계 개선효과 분석
  - IV. 적용 및 평가
  - V. 결론 및 향후 연구과제
- 참고문헌

Key Words: 교통물류거점, 네트워크 연계성, 공급 연계성, 체감 연계성, 연계성 지수, 연계성 지수 감소율  
Transport hub, Network connectivity, Supplied connectivity, Experienced connectivity  
Connectivity index, Reduction rate of connectivity index

요 약

본 연구에서는 교통물류거점의 네트워크 연계성 개선효과를 분석하기 위한 방법론을 제시하였다. 기존에 개발된 노드의 연계성 산출 모형을 사용하여 공급 연계성과 체감 연계성을 정의하였고, 교통물류거점의 네트워크 연계성 분석 범위와 분석 대상 노드 설정 알고리즘을 제시하였다. 또한 교통물류거점의 네트워크 연계성 개선효과 분석 과정을 체계화하였으며, 연계성 개선사업의 효과평가 방법 및 기준을 제시하였다. 방법론을 사례 연구에 적용한 결과 적절한 결과를 도출하였으며 전국 도로 네트워크에 실제 적용 가능하다고 판단된다. 교통물류거점의 네트워크 연계성 분석 결과 값들이 어느 정도 축적된 이후에는 네트워크 연계성의 서비스수준을 판단하기 위한 추가 연구가 필요하다.

This study proposes a methodology for assessing the improvement of network connectivity of transport hubs. Extending a previously developed model that measures the connectivity of a node in transportation networks, we define two quantities called the supplied connectivity and the experienced connectivity. Using these quantities, we provide a systematic procedure for analyzing the network connectivity of a transport hub and also suggest criteria for determining whether a given project is effective in improving the network connectivity of the transport hub. The application of the methodology to a test site produces reasonable results, and as such it is expected that the methodology can be used for various transport hubs in the national road network. Once enough data from the application of the methodology are accumulated, a further study on the level of service in terms of network connectivity needs to be followed.

## I. 서론

### 1. 연구의 배경 및 목적

국토해양부는 2009년 6월, 기존의 「교통체계효율화법」을 “육상, 해상, 항공분야의 복합수송체계의 발전, 글로벌 교통물류 경쟁 격화 등 대내외 여건변화에 적극 대처하기 위하여 교통시설투자의 효율성 증대, 거점중심 연계교통망 구축, 지능형 교통체계 개발 등 고효율·저비용형 국가통합교통체계 구축을 촉진하고 법률의 시행과정에 나타난 제도적 미비점을 전면적으로 개선·보완하기 위해” 「국가통합교통체계효율화법」으로 전부 개정하였다(국토해양부, 2008).

개정된 「국가통합교통체계효율화법」에서 중요하게 다루는 내용 중 하나가 교통물류거점의 연계교통체계 고도화 부분이다. 이는 교통 소문상태가 혼잡한 지역의 교통 혼잡을 완화하기 위해 교통시설을 추가로 공급하던 기존의 교통시설 구축방향을 국가 전체적인 통합 교통네트워크의 효율성을 향상시키기 위해 교통물류거점 중심의 연계교통체계를 구축하는 방향으로 패러다임을 전환시키고자 하는 의도이다.

이를 위해서는 교통물류거점을 중심으로 한 연계교통체계의 현재 상태를 파악하고 이를 어떤 수준으로 개선시킬 것인지에 대한 네트워크 차원의 분석이 요구된다. 여기서 교통물류거점은 교통 네트워크에서 특정한 노드에 해당하므로 분석의 중심은 노드가 되고 분석의 내용은 네트워크상에서 그 노드의 연계 수준이 된다. 그러나 기존의 교통 네트워크 분석은 노드가 아닌 링크를 대상으로 이루어져왔으며 교통 네트워크에서 노드의 특성을 분석하는 모형이나 방법론에 대한 연구는 활발하게 이루어지지 않았다.

기존의 교통시설 투자사업 효과분석에서는 교통시설의 개선에 따라 영향권 내의 링크들에서 발생하는 통행 시간 절감, 운행비용 절감 등의 편익을 산출하고, 이를 교통시설 개선에 요구되는 비용과 비교하여 비용대비 편익이 클 경우 사업의 경제성이 있는 것으로 판단한다. 이러한 비용·편익 분석은 영향권 내 교통체계의 전반적인 개선효과를 분석하기 때문에 특정 교통물류거점의 연계교통체계 측면에서의 개선효과를 구분하지 못하는 한계가 있다. 즉, 교통물류거점의 연계교통체계 분석의 초점이 특정 개선사업이 해당 교통물류거점의 연계교통체계 개선에 미치는 영향이 얼마나 되는지를 분석하는데 있기

때문에 기존의 교통시설 투자사업의 효과분석 방법을 적용하는 것은 무리가 따른다. 이에 본 연구에서는 교통시설 개선사업이 특정 교통물류거점의 연계교통체계 개선에 미치는 효과를 평가할 수 있는 분석 방법론을 제시하고자 한다.

### 2. 연구의 범위 및 내용

본 연구에서는 교통물류거점의 연계교통체계에 대한 현황을 파악하고 연계교통체계 개선사업의 효과를 평가하기 위한 분석 방법론을 제시하고자 한다.

「국가통합교통체계효율화법」에서는 교통물류거점을 하나 또는 둘 이상의 교통수단을 이용하여 대규모 여객 또는 화물의 연계운송·환승·환적·하역·보관 등 주요 교통물류활동이 이루어지고 있는 공항·항만·철도역·터미널·산업단지 등 주요 근거지로서 교통물류활동의 성격 및 규모에 따라 제1종, 2종, 3종으로 구분하고 있다. 본 연구에서는 교통물류거점을 대량의 여객이나 화물 통행량이 발생·도착하는 지점 또는 시설로 보다 포괄적으로 정의하고자 한다.

유정복·채찬들(2007)에서와 같이 본 연구에서 말하는 교통물류거점의 연계교통체계의 분석 범위는 교통물류거점을 중심으로 주변 국가 기간망까지로 한정짓는다. 따라서 교통물류거점의 연계교통체계 개선사업은 교통물류거점과 주변 국가 기간망까지의 연계성을 향상시키는 교통시설 개선 사업을 말한다. 여기서 국가 기간망이란 고속도로, 일반국도, 지역 간 철도망 등이 될 수 있으나, 본 연구에서는 일단 고속도로를 중심으로 분석한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 연계교통체계 분석 방법과 노드의 연계성 분석 방법에 대한 기존 연구들을 고찰하고, 3장에서는 노드의 연계성 산정 모형을 활용한 연계교통체계의 현황과 개선사업의 효과를 평가하는 방법론을 제시한다. 4장에서는 실제 연계교통체계 개선사업의 효과분석을 통해 본 연구에서 제시한 방법론의 적용성과 결과의 적정성을 검증한다. 5장에서는 본 연구의 결론을 맺고 향후 연구 과제를 제시한다.

## II. 기존연구 고찰

### 1. 연계교통체계 분석

기존의 「교통체계효율화법」에서는 항만, 공항, 복합

화물터미널, 유통단지, 산업단지 및 대규모 개발사업 추진시 국가기간교통시설과의 연계성을 위한 교통체계구축대책(이하 '연계교통체계구축대책')을 수립·시행하도록 규정하였는데, 이에 따라 몇 건의 연계교통체계구축대책이 수립되었다.

건설교통부(2003)는 경부고속철도 이용자의 접근성 및 환승편의를 제고시켜 경부고속철도 이용을 활성화시키기 위해 경부고속철도의 연계교통체계 구축 기본계획을 수립하였다. 이 계획에서는 서울역, 용산역을 비롯한 8개 역별 연계교통시설의 현황과 문제점을 파악하고 연차별 연계교통체계 정비계획을 제시하였다.

광명시(2004)는 경부고속철도 광명역사 신축, 소하지구 택지개발, 도심 재건축 및 재개발추진 등으로 인한 교통체계의 재정비를 위해 광명시의 연계교통체계 개선계획을 수립하였다. 이 계획에서는 광명시 전역을 1차 공간적 범위로 설정하고 광명시의 택시와 버스의 운영체계 전반에 대한 개선계획을 제시하고 있다.

대한주택공사(2005)는 경부고속철도 천안아산역과 아산신도시 개발에 따라 주변지역과의 연계교통체계 구축대책을 수립하였다.

기존에 수립된 연계교통체계구축대책은 도시교통정비 기본계획, 광역교통개선대책, 교통영향분석개선대책(구 교통영향평가) 등과 전혀 차별화되지 못하였다. 광명시(2004)와 대한주택공사(2005)는 분석의 범위를 광명시와 아산시 전체로 설정하고 있어 도시교통정비기본계획이나 광역교통개선대책의 내용을 그대로 모방하고 있으며, 건설교통부(2003)는 경부고속철도역을 대상으로 한 개선계획을 수립하고는 있으나 연계대상과 개선수준을 구체화하지 않아 교통영향분석개선대책에서 검토하는 단계적 개선안과 도시교통정비기본계획이나 광역교통개선대책에서 검토하는 중장기적 개선안을 혼합하여 제시하는 수준에 머물렀다. 또한 개선계획의 효과분석에 있어서도 해당 지점의 연계성 향상 정도를 분석하는 대신에, 링크와 교차로의 혼잡감소 정도와 개별 사업의 경제성 여부를 분석하고 있어 연계교통체계 측면에서의 분석이라 볼 수 있는 차별성이 없다.

국토해양부가 「국가통합교통체계효율화법」의 개정에 따라 제시한 「연계교통체계구축대책의 수립에 관한 지침」(국토해양부, 2009)에는 비교적 상세한 조사 및 분석 내용들이 기술되어 있지만, 이 지침 역시 연계교통체계 측면에서의 차별점이 명확하지 않다.

## 2. 노드의 연계성 분석

앞에서도 언급한 바와 같이 교통물류거점은 교통 네트워크에서 특정한 노드에 해당하므로 교통물류거점의 연계성 산정을 위해서는 노드 중심의 분석이 이루어져야 한다. 하지만 교통 네트워크 분석에서 노드를 대상으로 한 연구는 많지 않으며, 또한 네트워크 연계체계를 어떻게 측정할 것인지에 대해서도 보편적인 공감대가 형성되어 있지 않다.

네트워크에서 노드 자체가 갖는 중요도에 관한 연구는 주로 사회 네트워크(social network) 분야에서 이루어져 왔다. 사회 네트워크 이론에서 노드의 중요성은 대부분 중심성(centrality)을 산정하는 지표들에 의해 평가되었다(Newman, 2008; 박준식·강성철, 2010a). 하지만 중심성 지표들은 단지 네트워크의 형상(topology)만을 고려할 뿐 노드 및 링크의 속성을 반영하지 못하기 때문에 교통 네트워크에 직접 활용하기에는 적합하지 않다.

교통 네트워크에서의 연계성 분석에 관한 해외 연구 사례는 찾아보기 어렵다. Bell(2000), Chen et al.(2002) 등은 교통 네트워크의 신뢰성(reliability)에 대한 연구를 수행하였다(박준식·강성철, 2010b). 여기서 제시된 네트워크 신뢰성 측정 지표들은 특정 통행 시간 또는 용량을 초과하지 않는 상태에서 네트워크가 '작동'할 확률을 나타내는 것으로 본 연구에서 고려하는 교통 네트워크에서의 연계성을 표현하기에는 적절하지 않다.

이에 반해 국내에서는 교통 네트워크에서의 연계성 분석에 대한 다음과 같은 선행 연구들이 수행된 바 있다. 박준식 외(2010)는 단일수단 대중교통 네트워크를 대상으로 네트워크의 연계성을 향상시키기 위한 분석방법을 제시하였다. 이 연구에서 제시한 연계성 산정 모형에서는 두 지점을 연결하는 노선의 수가 많고 대용량의 차량이 자주 운행할수록 그리고 통행시간이 적게 걸릴수록 연계성이 높게 산정된다. 해당 노드를 경유하는 통행수요의 비중을 따라 노드의 중요도를 산출하여 중요도가 높은 노드를 연계성 개선의 우선순위가 높은 지점으로 도출하였다.

박준식·강성철(2010a)은 복합수단 대중교통 네트워크에서 환승센터의 연계성을 산정하는 모형을 제시하였다. 이 연구에서는 정류장의 대중교통 연계성을 "해당 정

류장에 도착한 이용자가 해당 정류장을 서비스하는 노선을 통해 네트워크 내 타 정류장으로 이동할 수 있도록 제공되는 대중교통 시스템의 서비스수준을 나타내는 척도”로 정의하였다. 노선연장, 수송용량, 통행속도로 이루어진 육면체의 부피를 노선의 연계강도로 규정하고 해당 정류장을 서비스하는 모든 노선들의 연계강도의 합을 정류장의 연계성 지수로 산출하였다. 환승센터의 연계성 지수는 환승센터를 이루는 정류장들 간의 거리에 따라 이용자수용비율만큼 감소된 각 정류장의 연계성 지수의 합으로 산출하였다.

박준식·강성철(2010b)은 도로 네트워크에서 노드의 연계성을 산정하는 모형을 구축하였다. 이 연구에서는 노드의 연계성을 네트워크 내의 타 노드들과 연결되어 있는 정도로 정의하고, 네트워크 내의 타 노드들과 용량이 크고 통행시간이 짧은 여러 경로들로 연결되어 있는 노드는 네트워크 연계성이 좋다고 하였다. 이 연구에서 구축한 노드의 연계성 산정모형은 두 지점을 연결하는 경로의 수와 각 경로들의 굴곡도, 설계속도 및 용량을 고려하고 있으며, 경로집합 생성 알고리즘과 각 지점들의 연결 가중치 산정 방법론도 제시하고 있어 노드의 연계성 평가에 일반적으로 적용 가능한 것으로 평가된다.

본 연구에서는 박준식·강성철(2010b)이 제시한 연계성 산정 모형을 활용하여 교통물류거점의 네트워크 연계성 개선효과 분석 방법론을 제시하고자 한다.

### III. 교통물류거점의 네트워크 연계성 개선효과 분석 방법론

#### 1. 노드의 연계성 산정 모형

박준식·강성철(2010b)은 도로 네트워크에서 노드의 연계성을 정량적으로 산정하기 위해 다음과 같은 모형을 제시하였다.

우선 두 노드  $a$ 와  $b$ 간의 연계성 지수  $CI_{ab}$ 를 식(1)과 같이 산출한다.

$$CI_{ab} = \sum_{r \in R_{ab}} \frac{T_{ab}}{T_{ab}^r} \times d_{ab}^r \quad (1)$$

여기서,  $T_{ab}$  :  $a$ 와  $b$ 의 직선거리를 최대 설계속도로 통행할 경우의 통행시간

$T_{ab}^r$  :  $a$ 와  $b$ 를 연결하는 경로  $r$ 의 통행시간

$d_{ab}^r$  :  $a$ 와  $b$ 를 연결하는 경로  $r$ 의 용량

$R_{ab}$  :  $a$ 와  $b$ 를 연결하는 경로의 집합

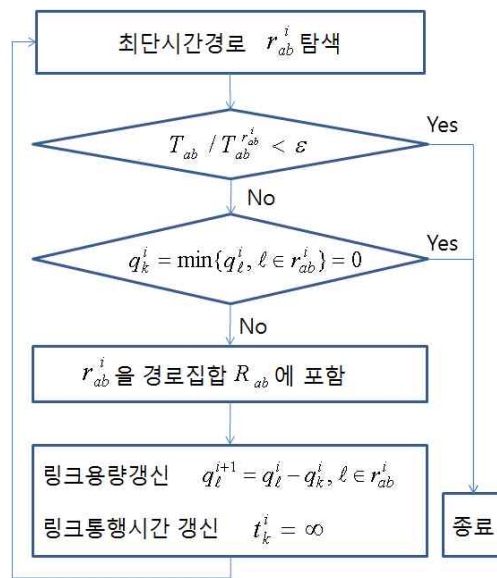
식(1)의 연계성 지수는 두 노드 사이의 경로 수, 경로의 용량, 경로의 굴곡도, 통행시간 등을 종합적으로 고려한 지표이다. 연계성 지수 (1)은 방향성을 가지며, 노드  $a$ 에서 노드  $b$ 로 가는 경로와 노드  $b$ 에서 노드  $a$ 로 가는 경로가 서로 대칭일 경우에만  $CI_{ab}$ 와  $CI_{ba}$ 가 동일하고, 그렇지 않을 경우에는 서로 다른 값을 가진다.

$R_{ab}$ 는 일반적으로 노드  $a$ 에서  $b$ 를 연결하는 모든 경로들의 집합이다. 하지만 통행자들이 이용할 가능성이 적은 상당히 우회하는 경로들을 제외하기 위하여 식(2)와 같은 집합을 사용할 수도 있다.

$$R_{ab} = \{r \mid T_{ab}/T_{ab}^r \geq \epsilon, 0 \leq \epsilon \leq 1\} \quad (2)$$

상기의 경로집합은 Ford-Fulkerson의 최대유량(max flow) 알고리즘에 기반을 둔 <그림 1>과 같은 알고리즘에 의하여 생성된다.

네트워크에서 노드  $a$ 의 연계성을 평가하기 위해서는 노드  $a$ 에서 다른 노드들로의 유출 연계성과 다른 노드들에서 노드  $a$ 로의 유입 연계성을 모두 고려해야 한다. 노드  $a$ 의 유출 연계성 지수  $CI_a^+$ 와 유입 연계성 지수  $CI_a^-$ 는 각각 식(3)과 식(4)와 같이 정의된다.



<그림 1> 경로집합 생성 알고리즘

$$CI_a^+ = \sum_{b \in N} \theta_{ab}^+ CI_{ab} \quad (3)$$

$$CI_a^- = \sum_{b \in N} \theta_{ba}^- CI_{ba} \quad (4)$$

여기서  $N$ 은 노드  $a$ 의 연계성 분석을 위한 대상 노드들의 집합이며,  $\theta_{ab}^+$ 는 노드  $a$ 에서 노드  $b$ 로의 유출 연결 가중치를,  $\theta_{ba}^-$ 는 노드  $b$ 에서 노드  $a$ 로의 유입 연결 가중치를 의미한다( $\sum_{b \in N} \theta_{ab}^+ = \sum_{b \in N} \theta_{ba}^- = 1$ ).

노드  $a$ 의 연계성 지수  $CI_a$ 는 식(5)와 같이 노드  $a$ 의 유출 연계성 지수와 유입 연계성 지수의 평균값으로 정의된다.

$$CI_a = \frac{1}{2}(CI_a^+ + CI_a^-) \quad (5)$$

연결 가중치  $\theta_{ab}^+$ 와  $\theta_{ba}^-$ 는 노드  $a$ 에 대한 노드  $b$ 의 연결 중요도를 의미한다. 두 노드 간 통행량이 많을수록 연결 중요도가 높고, 인접한 노드일수록 연결 중요도가 높다고 볼 수 있으므로 대상 노드 간의 거리와 통행량을 이용하여 식(6)과 같이 유출, 유입 연결 가중치를 산정한다.

$$\theta_{ab}^+ = \frac{q_{ab}/d_{ab}}{\sum_{k \in N} q_{ak}/d_{ak}}, \quad \theta_{ba}^- = \frac{q_{ba}/d_{ba}}{\sum_{k \in N} q_{ka}/d_{ka}} \quad (6)$$

여기서  $q_{ij}$  : 노드  $i$ 에서 노드  $j$ 로의 통행량  
 $d_{ij}$  : 노드  $i$ 에서 노드  $j$ 까지의 직선거리

## 2. 공급 연계성과 체감 연계성

기본적으로 교통시설의 공급수준과 연계성은 비례적 상관관계를 갖는다. 그러나 교통시설의 공급수준이 높다 하더라도 통행량이 많아 교통 혼잡수준이 높은 경우에는 실제 통행자들이 체감하는 연계성은 낮을 것이고, 교통시설의 공급수준이 낮더라도 통행량이 없어 혼잡이 발생하지 않는 경우에는 통행자들이 체감하는 연계성은 높을 수 있다. 따라서 연계성 분석에서는 순수한 공급 측면에서의 연계성과 교통 혼잡에 의해 실제로 통행자들이 체감하는 연계성을 같이 검토해야 한다.

식(1)에서 노드  $a$ 와  $b$ 를 연결하는 경로  $r$ 의 통행시간  $T_{ab}^r$ 에 통행량이 배정되지 않은 상태에서의 자유통행시간을 사용하게 되면  $a$ 에서  $b$ 로의 공급 측면에서의 연계

성이 산출된다. 본 연구에서는 이를 '공급 연계성'이라 한다.

이와 달리 경로  $r$ 의 실제 통행시간(즉, 통행량이 배정된 상태에서의 통행시간)을  $T_{ab}^r$ 에 적용할 경우, 식(1)은 교통 혼잡수준이 반영되어 통행자들이 실제로 체감하는 연계성을 나타내며, 이를 '체감 연계성'이라 한다. 이하에서  $CI_a$ 는 노드  $a$ 의 공급 연계성 지수를 나타내고, 노드  $a$ 의 체감 연계성 지수는 공급 연계성 지수와 구분하기 위하여  $\widehat{CI}_a$ 로 표기한다. 통행량이 배정된 상태에서의 경로의 통행시간(즉, 혼잡을 감안한 통행시간)은 그 경로의 자유통행시간보다 항상 크거나 같으므로  $CI_a \geq \widehat{CI}_a$ 의 관계가 성립한다.

교통 혼잡으로 인해 감소되는 연계성의 정도는 식(7)과 같은 연계성 지수 감소율  $\delta$ 로 표현할 수 있다.

$$\delta = \frac{CI_a - \widehat{CI}_a}{CI_a} \quad (7)$$

연계성 지수 감소율  $\delta$ 는 0과 1사이의 값을 가지는데, 교통 혼잡이 전혀 발생하지 않아 공급 연계성 지수  $CI_a$ 와 체감 연계성 지수  $\widehat{CI}_a$ 가 같을 경우  $\delta=0$ 이 되고, 교통 혼잡이 심각하여 체감 연계성 지수가 공급 연계성 지수에 비해 매우 작게 산출될 경우에는  $\delta$ 가 1에 근접하게 된다.

## 3. 연계성 분석 대상 노드 설정

「국가통합교통체계효율화법」에서 고려하는 교통물류거점의 연계교통체계 개선 범위는 교통물류거점에서 국가 기간망까지로 한정된다. 즉, 교통물류거점 중심 연계교통체계 개선사업의 취지는 국가 기간망에서 각 교통물류거점까지의 말단 지선 교통망을 개선하여 전체 교통네트워크의 효율을 향상시키는 것이 비용 대비 효과를 높일 수 있다는 것이다. 따라서 교통물류거점의 연계교통체계 분석은 통행 기종점을 대상으로 하는 것이 아니라 교통물류거점에서 인접한 국가 기간망까지를 대상으로 한다.

하지만 인접한 국가 기간망 상의 어떤 노드들을 교통물류거점의 연계성 분석 대상 노드로 설정해야 하는지 명확하지 않은 경우가 많다. 본 연구에서는 교통물류거점  $a$ 의 연계성 분석 대상 노드들을 거점으로부터 각 통행 종점까지의 최단경로 상의 노드들 중 거점에서 가장

가까운 국가 기간망과의 연결점들로 설정한다. 이를 수식으로 표현하면 식(8)과 같다.

$$N(a) = \left\{ b_j \mid d(a, b_j) = \min\{d(a, b), \forall b \in N_h \cap N_{r_{aj}}\}, \forall j \in N_c \right\} \quad (8)$$

여기서  $d(a, b)$ 는 교통물류거점  $a$ 에서 분석 대상 노드  $b$ 까지의 거리를 나타내고,  $N_c$ 는 존 센트로이드들의 집합,  $N_{r_{aj}}$ 는 교통물류거점  $a$ 에서 발생하는 통행의 종점 노드  $j$ 까지의 최단경로  $r_{aj}$ 에 속한 노드들의 집합,  $N_h$ 는 국가 기간망  $h$ 에 속한 노드들의 집합을 각각 나타낸다.  $N(a)$ 는 다음의 알고리즘에 의해 구해진다.

- <연계성 분석 대상 노드 설정 알고리즘>  
 Step 1.  $N_c = \emptyset$  이면 종료; 아니면 센트로이드  $j \in N_c$ 를 선택하고  $j$ 를  $N_c$ 에서 제거  
 Step 2. 교통물류거점  $a$ 에서 통행 종점  $j$ 까지의 최단 경로  $r_{aj}$  탐색  
 Step 3. 최단경로  $r_{aj}$ 의 노드들 중 거점  $a$ 에서 가장 가까운 국가 기간망과의 연결점  $b_j$  탐색  
 Step 4.  $b_j$ 를 집합  $N(a)$ 에 포함시키고 Step 1로 돌아가서 반복

일반적으로 거점  $a$ 로의 유출과 유입 경로가 서로 다르기 때문에 유출 연계성 분석 대상 노드들은 유입 연계성 분석 대상 노드들과 다르게 된다. 따라서 거점  $a$ 의 유출 연계성 지수와 유입 연계성 지수를 산정하기 위해서는 분석 대상 노드들을 각각 설정해야 한다. 위에서 설명한  $N(a)$ 는 유출 연계성 분석을 위한 대상 노드 집합이며 유입 연계성 분석 대상 노드 집합과 구분하기 위해 이하에서는  $N^+(a)$ 라 표기한다. 유입 연계성 분석을 위한 대상 노드 집합  $N^-(a)$ 는 식(8)과 유사하게 식(9)와 같이 설정되며 앞에서 설명한 <연계성 분석 대상 노드 설정 알고리즘>을 수정하여 구할 수 있다.

$$N^-(a) = \left\{ b_j \mid d(b_j, a) = \min\{d(b, a), \forall b \in N_h \cap N_{r_{ja}}\}, \forall j \in N_c \right\} \quad (9)$$

거점  $a$ 의 연계교통체계 개선사업의 효과분석을 할 경우에는 사업시행 후 연계성 분석 대상 노드들이 사업시행 전 분석 대상 노드들과 달라질 가능성을 고려해야 한다. 왜냐하면 연계교통체계 개선 사업의 시행으로 인해

최단경로 상에 있던 노드들이 더 이상 최단경로 상에 있지 않을 수도 있고, 새로운 최단경로 상의 노드들이 추가될 수도 있기 때문이다. 이 경우 사업 미시행시와 시행시의 분석 대상 노드들의 변경으로 인해 공급이 증가하였음에도 불구하고 공급 연계성이 감소하는 것으로 계산되는 모순이 발생할 수 있다. 이러한 모순을 예방하기 위해 사업 미시행시와 시행시의 분석 대상 노드들을 동일하게 설정할 필요가 있다. 따라서 식(10), (11)과 같이 사업 미시행시의 분석 대상 노드 집합과 사업 시행시의 분석 대상 노드 집합의 합집합을 최종 분석 대상 노드 집합으로 설정한다.

$$N^+(a) = N^+(a)_{\text{미시행}} \cup N^+(a)_{\text{시행}} \quad (10)$$

$$N^-(a) = N^-(a)_{\text{미시행}} \cup N^-(a)_{\text{시행}} \quad (11)$$

분석 대상 노드들의 집합  $N^+(a)$ 와  $N^-(a)$ 의 원소들에 대한 연결 가중치를 거리와 통행량의 비율에 따라 설정하기 위해서는 거점  $a$ 에서 집합  $N^+(a)$ 와  $N^-(a)$ 의 노드들 간의 통행량을 산출해야 한다. 통행 기준점이 아닌 노드 간의 통행량을 산출하기 위해서는 통행배정이 수행되어야 하는데, 본 연구에서는 여러 가지 통행배정 방법 중 균형 통행배정을 사용하여 연결가중치를 산출하는 방법을 제안한다. 사업 미시행시의 유출, 유입 연결 가중치  $\theta_{ab}^+$ ,  $\theta_{ab}^-$ 는 식(12)를 통해 산출되고 사업 시행시의 유출, 유입 연결 가중치  $\omega_{ab}^+$ ,  $\omega_{ab}^-$ 는 식(13)을 통해 산출된다.

$$\theta_{ab}^+ = \frac{q_{ab}/d_{ab}}{\sum_{k \in N^+(a)} q_{ak}/d_{ak}}, \quad \theta_{ba}^- = \frac{q_{ba}/d_{ba}}{\sum_{k \in N^-(a)} q_{ka}/d_{ka}} \quad (12)$$

$$\omega_{ab}^+ = \frac{\phi_{ab}/d_{ab}}{\sum_{k \in N^+(a)} \phi_{ak}/d_{ak}}, \quad \omega_{ba}^- = \frac{\phi_{ba}/d_{ba}}{\sum_{k \in N^-(a)} \phi_{ka}/d_{ka}} \quad (13)$$

- 여기서  $q_{ij}$  : 사업 미시행시 노드  $i$ 에서  $j$ 로의 균형 배정 통행량  
 $\phi_{ij}$  : 사업 시행시 노드  $i$ 에서  $j$ 로의 균형 배정 통행량  
 $d_{ij}$  : 노드  $i$ 에서  $j$ 까지의 직선거리

#### 4. 연계교통체계 개선효과 분석

교통물류거점의 연계교통체계 개선사업의 효과분석은 <그림 2>의 과정에 의해 수행된다. 우선 존 분할을 통해

분석하고자 하는 교통물류거점을 존 센트로이드로 설정하고 해당 교통물류거점의 기준점 통행량을 추정한다. 교통물류거점의 기준점 통행 패턴을 이용하여 앞에서 제시한 분석 대상 노드 집합을 설정한다. 그 다음 사업 미시행시와 시행시를 구분하여 통행량을 배정하고 분석 대상 노드들의 연결 가중치를 산정한다. 이어서 공급연계성과 체감 연계성을 산출하고 연계성 감소율  $\delta$ 를 산출한다. 최종적으로 사업시행으로 인한 연계성 개선효과를 종합적으로 분석한다.

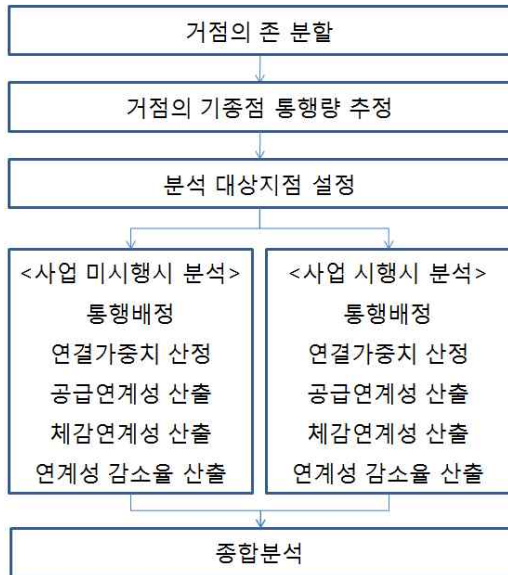
공급 연계성이 낮으면서 교통 혼잡으로 인해 감소되는 연계성의 정도가 큰(즉,  $\delta$ 가 큰) 지점이 연계교통체계 개선의 우선순위가 높고, 반대로 공급 연계성이 높으면서 교통 혼잡으로 인해 감소되는 연계성의 정도가 작은(즉,  $\delta$ 가 작은) 지점은 연계교통체계 개선의 우선순위가 낮을 것이다. 이들의 중간 영역인 공급 연계성이 높으면서  $\delta$ 가 큰 지점과, 공급 연계성이 낮으면서  $\delta$ 가 작은 지점에 대한 우선순위 결정을 위해서는 정책적 판단이 필요하다. 교통시설의 공급을 통해 지역발전을 도모하는 선공급 정책에서는 공급 연계성이 낮으면서  $\delta$ 가 작은 지점의 연계교통체계를 개선해야 하고, 반대로 기 개발된 지역의 체감 연계성 향상을 위해 교통공급을 지원하는

혼잡 완화형 정책에서는 공급 연계성이 높지만  $\delta$ 가 큰 지점의 연계교통체계를 개선해야 한다. 그러나 어떠한 경우라도 공급 연계성 또는  $\delta$ 의 크기만으로 연계교통체계 개선의 우선순위를 산정하면 안 되며, 두 가지 지표를 종합적으로 고려해야 한다.

연계교통체계 개선사업이 해당 교통물류거점의 연계성 향상에 미치는 효과를 판단하기 위해서는 공급 연계성 및 체감 연계성의 변화를 우선 고려해야 한다. 연계교통체계 개선사업은 교통물류거점과 인접 국가기간망 사이의 공급을 증대시키므로  $CI_{시행} \geq CI_{미시행}$ <sup>1)</sup>이 항상 성립한다(즉, 공급 연계성은 항상 개선된다). 하지만 체감 연계성이 항상 향상된다는 보장은 없는데 이는 새로운 교통시설의 공급이 실제 통행시간의 증가를 가져올 수도 있기 때문이다<sup>2)</sup>. 따라서 사업이 교통물류거점의 연계성을 개선시키는 효과가 있다고 말하기 위해서는 식(14)가 만족되어야 한다.

$$\hat{CI}_{시행} > \hat{CI}_{미시행} \tag{14}$$

연계교통체계 개선사업의 효과를 조금 더 보수적으로 판단하기 위해서는 연계성 감소율의 변화를 추가적으로 고려할 필요가 있다.  $\delta_{시행}$ 이  $\delta_{미시행}$ 보다 커진다고 하자. 여기에는 두 가지 이유가 있을 수 있다. 첫 번째는 공급 연계성이 향상되었다 할지라도 체감 연계성이 그만큼 향상되지 못했다는 것으로, 해당 사업이 교통물류거점의 연계교통체계 개선보다는 주변지역의 혼잡완화에 더 큰 기여를 하는 경우에 해당한다. 그러한 사업은 주변지역의 혼잡을 완화시켜 경제성은 확보될 수 있으나 해당 교통물류거점의 연계성은 향상시키지 못한다고 볼 수 있다. 두 번째는 통행량이 적어 교통 혼잡으로 인한 연계성 감소율이 작은 경우로, 공급수준을 향상시켜도 체감 연계성이 더 이상 증가하지 않는 상태이다. 이 상태에서 연계교통체계를 개선하는 것은 과잉 공급에 해당한다. 두 가지 경우 모두 연계교통체계 개선사업의 취지로는 적절하지 않기 때문에 식(14)와 식(15)를 함께 만족하는 사업만 시행하는 것이 바람직하다.



<그림 2> 교통물류거점의 연계교통체계 분석 과정

$$\delta_{시행} < \delta_{미시행} \tag{15}$$

1) 특정한 교통물류거점(a라 하자)에서 사업 시행시와 미시행시의 연계성 지수를 비교하는 것이므로  $CI_{a,시행} \geq CI_{a,미시행}$ 라고 표기해야 하나 간단한 표기를 위해 교통물류거점을 나타내는 아래 첨자를 생략하기로 한다.  
 2) 이를 Braess' paradox라 한다.

식(15)를 공급 연계성과 체감 연계성으로 표현하면 식(16)과 같고 이는 식(17)과 같이 정리된다.

$$\frac{C_{시행} - \widehat{C}_{시행}}{C_{시행}} < \frac{C_{미시행} - \widehat{C}_{미시행}}{C_{미시행}} \tag{16}$$

$$\frac{C_{시행}}{C_{미시행}} < \frac{\widehat{C}_{시행}}{\widehat{C}_{미시행}} \tag{17}$$

식(17)을 보면 사업시행으로 인한 체감 연계성의 증가율이 공급 연계성의 증가율보다 클 경우 식(15)의 조건을 만족하는 것으로 해석된다. 따라서 연계교통체계 개선사업이 의미를 갖는 조건은 체감 연계성이 증가하고, 체감 연계성의 증가율이 공급 연계성의 증가율보다 큰 경우로 요약할 수 있다.

만약 보다 강력한 제약조건을 설정하고자 할 경우에는 식(17)대신 식(18)을 사용할 수 있다.  $\gamma$ 값이 클수록 제약조건이 강력해져 연계교통체계의 개선효과가 있는 것으로 판단되는 사업이 적어지게 된다.

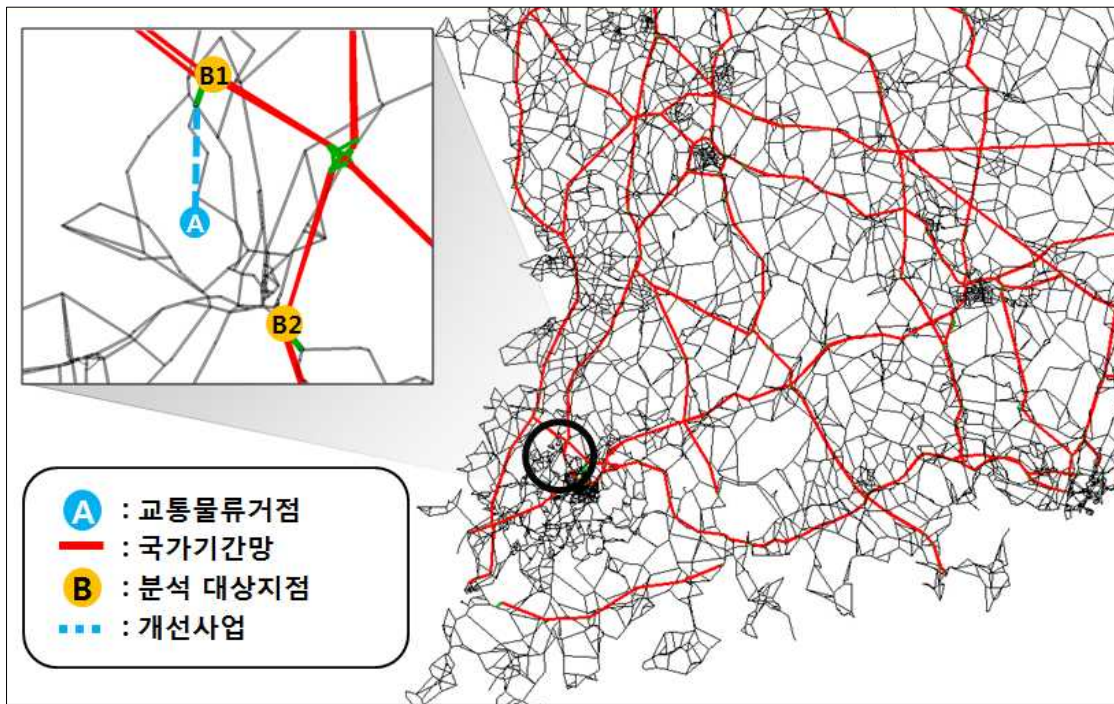
$$1 < \gamma < \frac{C_{시행}}{C_{미시행}} < \frac{\widehat{C}_{시행}}{\widehat{C}_{미시행}} \tag{18}$$

#### IV. 적용 및 평가

3장에서 제시한 교통물류거점의 네트워크 연계성 개선효과 분석 방법론의 적용성과 결과의 적절성을 검증하기 위해 특정 교통물류거점에 대한 연계교통체계를 분석해보았다.

분석할 교통물류거점은 <그림 3>에서 보는 바와 같이 전라남도 광주의 서북쪽에 위치하고 있으며 동쪽으로 호남고속도로가 남북방향으로 지나가고 북쪽으로 고창담양고속도로가 동서방향으로 지나가고 있다. 노드 A가 분석할 교통물류거점을 나타내고, 붉은색 굵은 실선은 국가기간망인 고속도로를 나타낸다. 교통물류거점 A의 연계성을 분석하기 위한 국가기간망 상의 노드로는 B1과 B2가 선정되었다. 교통물류거점 A와 노드 B1을 연결하는 점선은 연계교통체계 개선사업을 나타낸다.

<표 1>은 사업 미시행시의 연계성 지수 산출 결과이다. 교통물류거점 A에서 분석 대상 노드 B1까지의 직선거리는 약 2.5km이고 유출, 유입 통행량은 각각 4676대/일, 4484대/일이다. 교통물류거점 A에서 분석 대상 노드 B2까지의 직선거리는 약 4.2km이고 유출, 유입 통행량은 각각 2008대/일, 2111대/일이다. 교통물류거



<그림 3> 분석 대상 교통물류거점 및 네트워크



<표 1> 사업 미시행시 분석 대상 노드별 연계성 지수

	직선 거리 (km)	통행량 (대/일)		연결가중치 ( $\theta$ )		$CI_{\text{미시행}}$		$\hat{CI}_{\text{미시행}}$	
		유출	유입	유출	유입	유출	유입	유출	유입
B1	2.5	4676	4484	0.80	0.78	4330	4330	4031	4025
B2	4.2	2008	2111	0.20	0.22	3432	3432	3165	3169
종합						4141		3847	

점 A와 노드 B1, B2 간의 통행량은 Emme3에서 균형 배정 후 select-link analysis를 통해 산출하였다. 노드 B1의 연결 가중치는 유출과 유입이 각각 0.80, 0.78로 산출되었고, 노드 B2의 경우는 각각 0.20, 0.22로 계산되었다. 교통물류거점 A와 노드 B1 간의 공급 연계성은 4330으로 유출과 유입 모두 동일하게 산출되었는데, 이는 교통물류거점 A와 노드 B1까지의 경로가 서로 대칭을 이루기 때문이다. 하지만 체감 연계성은 유출과 유입이 각각 4031, 4025로 상이하게 산출되었는데, 이는 경로가 대칭을 이룬다고 할지라도 교통 혼잡이 반영된 통행시간이 다르게 산정되어질 수 있기 때문이다(교통 혼잡이 반영된 통행시간은 Emme3를 통해 균형 배정된 상태의 각 링크의 통행시간을 사용하여 산출한다). 노드 B2에 대해서도 같은 분석을 하면 공급 연계성은 유출과 유입이 3432로 동일한데 비해, 체감 연계성은 유출이 3165, 유입이 3169로 상이하게 산출되었다. 종합하면 연계교통체계 개선사업을 시행하기 전 교통물류거점 A의 공급 연계성 지수와 체감 연계성 지수는 각각 4141과 3847로 산출되었다.

<표 2>는 연계교통체계 개선사업 시행 후의 연계성

<표 2> 사업 시행시 분석 대상 노드별 연계성 지수

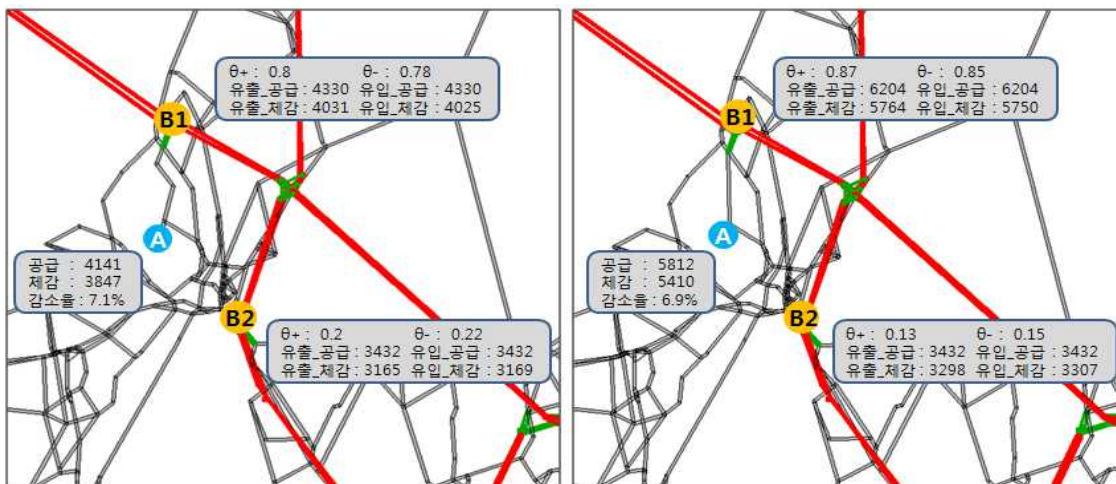
	직선 거리 (km)	통행량 (대/일)		연결가중치 ( $\theta$ )		$CI_{\text{시행}}$		$\hat{CI}_{\text{시행}}$	
		유출	유입	유출	유입	유출	유입	유출	유입
B1	2.5	5363	5049	0.87	0.85	6204	6204	5764	5750
B2	4.2	1321	1546	0.13	0.15	3432	3432	3298	3307
종합						5812		5410	

분석 결과이다. 연계교통 개선사업은 교통물류거점 A와 노드 B1을 연결하는 진입 도로의 선형 개선사업으로 구간 연장을 3.3km에서 2.9km로 감소시켜 경로의 굴곡 도로를 개선하게 된다.

사업 시행 후 교통물류거점 A와 노드 B1 간의 통행량은 증가하는 반면, 교통물류거점 A와 노드 B2 간의 통행량은 감소하는 것으로 나타났다. 이는 교통물류거점 A와 노드 B1을 연결하는 경로의 선형을 개선함에 따라 경로의 통행시간이 단축되어 교통물류거점 A에서 노드 B2로 이동하는 통행량의 일부가 노드 B1로 전환되기 때문이다. 통행량 변화로 노드 B1과 B2의 연결 가중치 역시 달라져 노드 B1의 교통물류거점 A에 대한 연결 중요성이 증가하게 된다.

노드 B1의 경우 공급 연계성이 유출, 유입 모두 4330에서 6204로 증가하였고, 유출 체감 연계성은 4031에서 5764로, 유입 체감 연계성은 4025에서 5750으로 증가하였다. 노드 B2의 경우 공급 연계성은 사업 시행 전과 동일하고 체감 연계성은 다소 개선되었다.

연계교통체계 개선사업의 효과 분석 결과는 <표 3>과 같다. 우선 체감 연계성이 3847에서 5410으로 증가하여



(가) 사업 미시행시 연계성 분석 결과

(나) 사업 시행시 연계성 분석 결과

<그림 4> 연계성 분석 결과개선사업 1)

식(14)의 조건을 만족한다. 또한 연계성 감소율이 7.1%에서 6.9%로 감소한 것으로 나타나 식(15)의 조건도 만족시키고 있다(달리 말하면, 사업 시행으로 공급 연계성은 40.3% 증가하고 체감 연계성은 40.6% 증가하여 식(17)을 만족시킨다). 따라서 이 사업은 교통물류거점 A의 연계교통체계 개선 효과가 있는 것으로 분석되었다.

<표 4>는 교통물류거점 A와 노드 B1을 연결하는 진입 도로의 선형을 더 개선하여 구간 연장을 2.6km로 감소시키는 경우의 연계성 개선효과 분석 결과를 보여주고 있다. 분석 결과를 보면 체감 연계성이 사업시행으로 인해 증가한 것으로 나타나 연계교통체계 개선사업의 효과가 있는 것으로 보이지만, 연계성 증가율을 살펴보면 공급 연계성이 33.9% 증가한 반면 체감 연계성은 30.7% 증가하여 개선효과의 판단 기준이 되는 식(17)을 만족시키지 못하고 있다. 다시 말하면 사업 시행으로 인해 체감 연계성이 향상되기는 하였지만 공급 연계성의 향상이 이를 초과하여 연계성 감소율이 7.1%에서 9.3%로 오히려 증가한 것이다. 사업 미시행시의 연계성 감소율이 7.1%로 낮은 수치임을 감안하면 통행량이 적은 상태로 판단되며(실제로 이 지역의 통행량이 매우 적어 혼잡이 발생하지 않음) 이러한 경우 공급을 추가하는 것은 과잉 공급으로 해석될 수 있다. 이를 통해 교통물류거점의 연계교통체계를 개선하기 위해 공급 연계성을 무작정 향상

시키는 것은 바람직하지 않으며 적절한 한계수준이 존재함을 알 수 있다.

V. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 교통물류거점의 네트워크 연계성 개선 효과를 분석하기 위한 방법론을 제시하였다. 기존에 개발된 노드의 연계성 산출 모형을 사용하여 공급 연계성과 체감 연계성을 새롭게 정의하였고, 교통물류거점의 네트워크 연계성 분석 범위와 분석 대상 노드 설정 알고리즘을 제시하였다. 또한 교통물류거점의 네트워크 연계성 개선효과 분석 과정을 체계화하였으며, 연계성 개선사업의 효과평가 방법 및 기준을 제시하였다. 방법론을 사례 연구에 적용한 결과 적절한 결과를 도출하였으며 전국 도로 네트워크에 실제 적용 가능하다고 판단된다.

본 연구에서는 교통물류거점의 네트워크 연계성 분석 범위를 거점에서 국가기간망까지로 한정하고 분석 대상 노드들을 고속도로 진출입 지점으로 설정하였다. 그러나 현실적으로는 고속도로에 준하는 국도도 존재하기 때문에 실제 분석에 있어서는 현장 상황을 잘 파악하여 분석 대상 노드들을 설정할 필요가 있다.

본 연구에서는 공급 연계성과 체감 연계성의 변화에 따른 연계교통체계 개선사업의 효과분석에 초점을 두었기 때문에 연계성 지수의 값 자체에 대한 기준치는 설정하지 않았다. 즉, 공급 연계성이나 체감 연계성이 어느 정도이면 서비스수준이 얼마나 좋은 것인지를 판단할 근거를 제시하지 못하였다. 현실적으로는 연계성이 어느 정도 서비스수준을 만족시키면 더 이상 개선할 필요가 없는 경우도 있기 때문에 이러한 경우를 판단하기 위해서는 연계성의 서비스수준을 판단할 수 있는 기준치 마련이 필요하다. 이는 연계성 분석의 결과 값들이 어느 정도 축적된 이후에 가능하기 때문에 향후 연구과제로 남긴다.

<표 3> 교통물류거점의 연계성 변화(개선사업 1)

	미시행시(A)		시행시*(B)	연계성증가율(B/A)
공급연계성(C)	4141	<(적합)	5812	1.403
				^(적합)
체감연계성(D)	3847	<(적합)	5410	1.406
연계성 감소율((C-D)/C)	0.071	>(적합)	0.069	-

\*도로 구간 선형개선 사업(구간 연장: 3.3km→2.9km)

<표 4> 교통물류거점의 연계성 변화(개선사업 2)

	미시행시(A)		시행시*(B)	연계성증가율(B/A)
공급연계성(C)	4141	<(적합)	5545	1.339
				∇(부적합)
체감연계성(D)	3847	<(적합)	5029	1.307
연계성 감소율((C-D)/C)	0.071	<(부적합)	0.093	-

\*도로 구간 선형개선 사업(구간 연장: 3.3km→2.6km)

알림: 본 논문은 대한교통학회 제63회 학술발표회(2010.10.28)에서 발표된 내용을 수정·보완하여 작성된 것입니다.

참고문헌

1. 건설교통부(2003), “경부고속철도 연계교통체계 구축 기본계획(2003~2020)”.

2. 광명시(2004), “광명역사 연계교통체계 개선계획”.
3. 국토해양부(2008), “교통체계효율화법 전부 개정 (안) 입법예고”.
4. 국토해양부(2009), “연계교통체계구축대책의 수립에 관한 지침”.
5. 대한주택공사(2005), “아산신도시 연계교통체계 구축대책”.
6. 박준식·장원재·오재학(2010), “대중교통 네트워크의 연계성 평가모형”, 교통연구, 제17권 제1호, 한국교통연구원, pp.1~11.
7. 박준식·강성철(2010a), “복합수단 대중교통 네트워크의 연계성 평가 모형”, 대한교통학회지, 제28권 제3호, 대한교통학회, pp.85~98.
8. 박준식·강성철(2010b), “도로 네트워크의 노드 연계성 산정에 관한 연구”, 대한교통학회지, 제28권 제4호, 대한교통학회, pp.129~139.
9. 유정복·채찬들(2007), “국가산업단지 연계교통체계 구축 활성화 방안 연구”, 교통 기술과 정책, 제4권 제2호, 대한교통학회, pp.60~78.
10. Bell, M. G. H.(2000), “A game theory approach to measuring the performance reliability of transportation networks”, Transportation Research Part B, Vol. 34, pp.533~545.
11. Chen, A., Yang, H., Lo, H. K. and Tang, W.(2002), “Capacity reliability of a road network: An assessment methodology and numerical results”, Transportation Research Part B, Vol. 36, pp.225~252.
12. Newman, M. E. J.(2008), “The mathematics of networks”, In The New Palgrave Encyclopedia of Economics, 2nd edition. Palgrave Macmillan, Basingstoke.

✉ 주 작 성 자 : 박준식  
 ✉ 교 신 저 자 : 강성철  
 ✉ 논문투고일 : 2010. 11. 2  
 ✉ 논문심사일 : 2010. 12. 20 (1차)  
                   2010. 12. 21 (2차)  
 ✉ 심사판정일 : 2010. 12. 21  
 ✉ 반론접수기한 : 2011. 4. 30  
 ✉ 3인 익명 심사필  
 ✉ 1인 abstract 교정필