

■ 論 文 ■

# 복합수단 대중교통 네트워크의 연계성 평가 모형 A Model for Evaluating the Connectivity of Multimodal Transit Networks

박 준 식  
(한국교통연구원 책임연구원)

강 성 철  
(한국교통연구원 책임연구원)

## 목 차

- I. 서론
    - 1. 연구의 배경 및 목적
    - 2. 연구의 범위 및 내용
  - II. 대중교통 네트워크의 특성 및 연계성 분석 방향
    - 1. 대중교통 네트워크의 특성
    - 2. 노드의 중요성 분석방법
    - 3. 연구방향 설정
  - III. 복합수단 대중교통 네트워크 연계성 분석 모형
    - 1. 대중교통 연계성의 개념 정립
    - 2. 노선의 연계강도
    - 3. 연계성 지수
    - 4. 환승센터의 연계성 분석
  - IV. 사례분석
  - V. 결론 및 향후 연구과제
- 참고문헌

Key Words : 대중교통, 복합수단 대중교통 네트워크, 연계성, 중심성, 연계성 지수, 환승센터, 서비스 수준  
Public Transportation, Multimodal Transit Networks, Connectivity, Centrality, Connectivity Index, Transfer Centers, Level of Service

## 요 약

대중교통 네트워크가 점점 더 복합수단화됨에 따라 네트워크의 연계성이 중요한 개념으로 대두되고 있다. 본 연구에서는 복합수단 대중교통 네트워크의 연계성을 평가하는 계량모형을 제시하였다. 이를 위하여 우선 대중교통 노선의 평가지표로 노선연장, 수송용량, 통행속도를 선정하고 이들의 곱을 노선의 연계강도로 정의하였다. 또한 사회 네트워크 분석에서 사용되는 노드의 중심성 지표 중 하나인 degree centrality 개념을 대중교통 네트워크에 적합하게 수정하였다. 노선의 연계강도와 그 노선이 서비스하는 정류장의 degree centrality를 곱하여 정류장의 연계 정도를 나타내는 지수를 개발하였다. 이를 토대로 복합수단 대중교통 네트워크 내의 노선 및 지역의 연계성 지수도 도출하였다. 또한 정류장의 연계성 지수와 이용자수용비용 함수를 이용하여 환승센터의 연계성을 평가하는 방법도 제시하였다. 사례연구 결과 본 연구에서 개발된 연계성 평가 모형은 복합수단 대중교통 네트워크의 특성을 제대로 반영하고 있으며, 대중교통 네트워크 내의 정류장, 노선, 지역의 연계성을 적절하게 평가할 수 있고, 또한 환승센터의 서비스수준 산정에 활용될 수 있음을 확인하였다.

As transit networks are becoming more multimodal, the concept of connectivity of transit networks becomes important. This study aims to develop a quantitative model for measuring the connectivity of multimodal transit networks. To that end, we select, as evaluation measures of a transit line, its length, capacity, and speed. We then define the connecting power of a transit line as the product of those measures. The degree centrality of a node, which is a widely used centrality measure in social network analysis, is employed with appropriate modifications suited for transit networks. Using the degree centrality of a transit stop and the connecting powers of transit lines serving the transit stop, we develop an index quantifying the level of connectivity of the transit stop. From the connectivity indexes of transit stops, we derive the connectivity index of a transit line as well as an area of a multimodal transit network. In addition, we present a method to evaluate the connectivity of a transfer center using the connectivity indexes of transit stops and passenger acceptance rate functions. A case study shows that the connectivity evaluation model developed in this study takes well into consideration characteristics of multimodal transit networks, adequately measures the connectivity of transit stops, lines, and areas, and furthermore can be used in determining the level of service of transfer centers.

본 연구는 국토해양기술연구개발사업 교통체계효율화사업(과제번호 : 06교통핵심 A02 "교통연계 및 환승시스템 기술개발")의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

## I. 서론

### 1. 연구의 배경 및 목적

대중교통 시스템의 현황을 파악하고 개선사항을 도출하기 위해서는 대중교통 시스템의 서비스수준 평가가 이루어져야 한다. 대중교통 시스템의 서비스수준 평가는 대중교통 시스템의 서비스를 제공받는, 즉 대중교통 시스템을 이용하는 이용자의 관점에서 평가되어야 한다. 이용자가 대중교통 시스템의 서비스를 제공받기 위해서는 가장 기본적으로 대중교통 시스템이 접근 가능해야 하므로 대중교통 시스템에 대한 접근성이 1차적인 서비스평가 항목으로 고려된다. 대중교통 시스템에 접근 가능하면 대중교통 시스템을 통해 목적지까지 얼마나 빨리, 효과적으로 이동할 수 있는지, 얼마나 정확하게, 정시에 목적지에 도착 가능한지 등의 이동성과 관련된 항목들이 평가의 대상이 된다. 또한 추가적으로 대중교통 시스템을 이용하는 것이 얼마나 편리한지, 얼마나 쾌적한 서비스를 제공하는지 등이 평가대상으로 고려된다.

최근에는 교통 시스템의 효율성을 향상시키고 온실가스 배출량을 감소시키고자 여러 가지 다양한 대중교통수단을 복합적으로 활용하는 복합수송 시스템에 관심이 집중되고 있으며, 철도역을 중심으로 한 대중교통중심개발(transit oriented development)과 같은 고밀복합개발이 새로운 관심사로 주목받고 있어 복합수단 대중교통 네트워크(multimodal transit network)의 연계성(connectivity)이 새로운 평가항목으로 고려되고 있다.

복합수단 대중교통 네트워크란 시내버스, 지하철, 고속버스, 지역 간 철도 등과 같이 노선 특성이 상이한 대중교통 시스템이 복합적으로 구성된 대중교통 네트워크를 말한다. 복합수단 대중교통 시스템의 이용을 활성화시키기 위해서는 시스템의 효율성과 편의성을 향상시켜야 하는데, 현재는 복합수단 대중교통 시스템의 효율성이 어느 정도인지, 또한 어떠한 방법으로 얼마나 향상시켜야 하는지를 분석할 방법론이 제대로 갖추어져 있지 않다.

교통수단간 연계 및 환승체계를 효율화시키는 것은 복합수단 대중교통 시스템의 효율성은 향상시킬 수 있는 중요한 수단이 되는데, 교통수단간 연계 및 환승체계의 효율화를 위해서는 복합수단 대중교통 네트워크의 연계성 평가가 반드시 필요하다. 본 연구는 복합수단 대중교

통 네트워크의 연계성 분석 모형을 개발하는데 주목적이었다.

### 2. 연구의 범위 및 내용

본 연구는 복합수단 대중교통 네트워크의 연계성 분석이 목적이므로 모든 대중교통 수단을 반영한 복합수단 대중교통 네트워크를 대상으로 한다. 대중교통 서비스에 대한 평가는 여러 가지 측면에서 이루어지게 되는데, 본 연구에서는 이들 서비스평가 항목 중 연계성에 초점을 두고 있다. 대중교통 네트워크의 연계성 평가는 네트워크의 형상(topology)을 분석하는 사회 네트워크 이론(social network theory)을 원용하되 대중교통 노선의 특성을 가미한다. 하지만 요금체계, 정보제공 시스템 등과 같은 시스템적 연결성은 본 연구에서 고려하는 연계성에 포함되지 않는다. 연구의 세부 내용은 다음과 같다.

2장에서는 대중교통 네트워크의 특성을 분석하고 네트워크에서 노드의 중요성을 분석하는 방법론을 고찰하여 본 연구의 목적을 달성하기 위한 연구의 방향을 설정한다.

3장은 복합수단 대중교통 네트워크의 연계성 분석 모형 개발 부분으로, 우선 대중교통 네트워크에서 연계성의 개념을 정립한 후, 정류장, 노선, 지역 및 환승센터의 연계성 평가지표를 제시한다.

4장에서는 서울역을 사례로 3장에서 개발한 복합수단 대중교통 네트워크의 연계성 분석 모형의 현실 적용성과 결과의 적정성을 검증한다.

5장에서는 본 연구의 결과를 요약하고 본 연구에서 개발한 복합수단 대중교통 네트워크 연계성 분석 모형의 활용방안 및 향후 연구과제를 제안한다.

## II. 대중교통 네트워크의 특성 및 연계성 분석 방향

### 1. 대중교통 네트워크의 특성

대중교통 네트워크는 대중교통 노선들의 집합으로 대중교통 노선이란 사전에 약속된 일련의 정류장(또는 정거장, 이하 정류장)에 대한 순차적 서비스를 말한다. 대중교통 네트워크에서 노드는 정류장이 되고 링크는 인접한 정류장을 연결하는 노선의 단위구간이 된다.

1) 대중교통 네트워크 모델링의 복잡성

① 동일한 두 노드를 연결하는, 특성이 다른 다수의 링크가 존재

노선의 단위구간이 링크가 되고 각 노선은 속성이 상이하기 때문에 두 정류장을 연결하는 모든 노선의 단위구간을 서로 다른 링크로 표현해야 한다. 따라서 두 노드를 연결하는 특성이 서로 다른 다수의 링크가 존재하게 된다.

② 노선 기반의 경로선택

도로 네트워크에서는 노드와 노드를 연결하는 서로 다른 링크들을 대안경로로 보고 그들 링크의 속성에 따라 경로선택이 이루어진다. 그러나 대중교통 네트워크에서는 한 노드의 유입링크와 출출링크가 서로 다른 노선에 속해있을 경우에는 노드에서 노선간 환승비용이 반영되어야 하기 때문에 도로 네트워크에서처럼 링크 자체의 속성만으로 경로선택이 이루어지지 않는다. 즉, 대중교통 네트워크에서는 노드와 노드는 노선의 단위구간인 링크로 연결되지만 경로선택은 노선의 단위구간인 링크가 반으로 이루어지기보다는 링크가 연결된 노선을 기반으로 이루어진다.

③ 노선의 속성에 종속적인 링크의 속성

대중교통 노선이 갖는 특성은 차량특성, 노선특성, 운행특성으로 구분된다. 차량특성요소는 차량의 용량, 주행속도, 가감속 능력 등이 있고, 노선특성요소는 노선의 연장, 전용차로 유무, 서비스하는 정류장의 순차적 연결 순서, 서비스하는 정류장의 평균 간격 등이 있으며, 운행 특성요소는 운행시간, 배차회수 및 배차시각, 평균 배차 간격 등이 있다.

이러한 여러 가지 특성들에 의해 노선의 전체적인 속성이 결정되는데, 노선의 단위구간인 링크의 속성은 노선의 속성에 종속적으로 결정된다. 즉, 대중교통 네트워크에서 링크의 속성은 노선의 차량특성, 노선특성, 운행 특성의 각 특성요소들에 의해 결정된다.

2) 대중교통 네트워크 분석의 어려움

앞에서 언급한 세 가지 이유로 인해 대중교통 네트워크의 모델링은 일반적인 도로망의 모델링보다 복잡하다. 일반적인 네트워크 분석 이론을 통해 대중교통 네트워크를 분석하는 것이 어려운 것은 이와 같은 대중교통 네트

워크 모델링의 복잡함으로부터 발생한다. 보다 상세하게는 다음과 같은 세 가지 어려움을 생각할 수 있다.

첫째, 모든 노선의 단위구간을 각기 다른 링크로 표현해야 하기 때문에 네트워크 규모가 커지면 링크의 개수도 비례적으로 증가하게 된다. 그런데 동일한 노드에 연결된 링크라 할지라도 각 링크가 속한 노선이 상이할 경우 이들 링크는 직접 연결되지 않고 환승을 통해서 간접적으로 연결된다. 이를 그래프로 표현할 때는 하나의 정류장 내에서 노드 분할이 이루어지고 분할된 각 노드는 환승 더미링크로 연결된다. 네트워크 규모가 커짐에 따라 이 같은 환승 더미링크의 개수는 기하급수적으로 증가하게 되어 네트워크 분석을 어렵게 한다.

둘째, 환승 더미링크의 속성은 일반적으로 환승 자체의 불편함, 환승 노선의 대기시간, 환승 접근시간 등으로 표현되는데, 이는 일반 링크의 속성과 상이하기 때문에 서로 다른 속성을 갖는 링크들로 구성된 네트워크를 하나의 분석 틀에서 분석해야 하는 어려움을 유발하게 된다.

셋째, 통행속도, 통행시간, 용량 등과 같은 링크의 여러 가지 속성별로 구분하여 다양하게 분석할 수는 있으나, 이러한 분석의 다양성은 개별 속성에 따른 분석결과와 유용성을 감소시킬 뿐만 아니라, 전체적인 결과의 종합화를 어렵게 하여 전체 결과의 유의미성을 확보하기 힘들게 만든다.

2. 노드의 중요성 분석방법

그동안 교통 네트워크 분석의 초점은 링크에 맞추어져왔다. 노드는 단지 속성이 다른 링크들을 연결하는 결절점으로만 생각되었기 때문에 교통 네트워크에서 노드가 갖는 속성에 대해서는 간과되어왔고 그로 인해 노드의 속성에 대한 분석이 이루어지지 않았으며 그에 대한 활용도 이루어지지 않았다.

교통부문에서와 달리 사회 네트워크(social network) 분야에서는 노드와 노드를 연결하는 링크보다는 노드 자체가 갖는 중요도에 대해서 많은 연구가 이루어져왔다(Bonacich, 1972; Freeman, 1979; Borgatti and Everett, 1997; Yang and Knoke, 2001; Wuchty and Stadler, 2003; Newman, 2004; Borgatti, 2005; Borgatti and Everett, 2006; Newman, 2007).

사회 네트워크 이론에서 노드의 중요성은 주로 중심성(centrality)으로 표현되는데, 중심성을 평가할 수 있는 여러 지표들이 제시되어왔다. 이 중 널리 쓰이는 지표

들은 다음과 같다.

### 1) degree centrality

degree centrality( $C_d$ )는 Freeman(1979)이 제안한 지표로, 노드에 직접 연결된 링크들의 수를 나타낸다(Borgatti, 2005). 많은 링크들이 연결된 노드의 중요성을 높게 평가하는 것으로 노드의 연결성을 나타내는 가장 기본적인 지표에 해당한다.

노드집합  $N$ 과 링크집합  $L$ 로 구성된 네트워크  $G(N, L)$ 에서 노드  $n$ 의 degree centrality,  $C_d(n)$ 은 식(1)과 같이 계산된다. 여기서  $A_{ns}$ 는 노드  $n$ 과 노드  $s$ 가 직접 연결되어 있을 경우에는 1, 그 외의 경우는 0의 값을 갖는 인접행렬(incidence matrix)의 행렬요소 값을 나타낸다.

$$C_d(n) = \sum_{s \in N} A_{ns} \quad (1)$$

철도역의 경우 연계되는 버스 노선수로 해당 철도역의 대중교통 연계성을 판단하기도 하는데, 연계 버스 노선수가 해당 역의 degree centrality 값이 되는 것이다. 연계 노선수는 해당 지점의 연계성을 나타내는 대표적인 지표이면서 가장 쉽게 산출할 수 있는 지표가 된다. 그러나 연계 노선수는 단지 노선의 개수만을 나타내기 때문에 노선의 속성에 대한 정보를 나타낼 수 없다. 따라서 degree centrality는 복합수단 대중교통 네트워크에서 노드의 중요성에 대한 정보를 제공하기에는 많은 한계가 따른다.

### 2) betweenness centrality

betweenness centrality( $C_b$ ) 역시 Freeman (1979)이 제안한 지표로, 네트워크 내의 두 노드를 연결하는 최단경로가 해당 노드를 경유하는 비율을 나타낸다(Borgatti, 2005). 두 노드를 연결하는 최단경로가 해당 노드를 많이 경유할수록 네트워크 내에서 해당 노드의 중요성이 높다고 볼 수 있다. 노드  $n$ 의 betweenness centrality,  $C_b(n)$ 은 식(2)와 같이 계산된다. 여기서  $\sigma_{st}$ 는 노드  $s$ 와  $t$ 를 연결하는 최단경로의 수를 나타내고,  $\sigma_{st}(n)$ 는 이 중 노드  $n$ 을 경유하는 경로의 수를 나타낸다.

$$C_b(n) = \sum_{s \neq t \neq n \in N} \frac{\sigma_{st}(n)}{\sigma_{st}} \quad (2)$$

betweenness centrality는 네트워크 내의 각 노드들을 연결하는 연결점으로써의 중요성을 나타내는 척도이다. 교통 네트워크에서 betweenness centrality가 높은 지점은 교통의 요충지 또는 병목지점으로 판단할 수 있기 때문에 네트워크 전체의 효율성을 높이기 위한 개선지점 선정을 위해 사용될 수 있을 것이다. 그러나 betweenness centrality가 높은 지점은 네트워크 내의 기중점들을 연결하는 경유지점, 즉 연결자로서 중요하기는 하지만 연결자로서의 성격을 노드의 연계성이라고 보기에는 다소 무리가 있다.

### 3) closeness centrality

closeness centrality( $C_c$ )는 Freeman(1979)이 제안한 지표로, 네트워크 내에 노드가 위치한 지리적 중심성을 나타내는 척도이다(Borgatti, 2005). 즉, 네트워크의 중심에 위치한 노드의 중요성을 높게 평가하는 것이다. 이는 타 노드들까지의 거리로 판단할 수 있는데, 노드  $n$ 의 closeness centrality,  $C_c(n)$ 은 식(3)과 같이 네트워크 내의 모든 노드들까지의 최단거리의 평균치로 표현하거나, 식(4)와 같이 네트워크 내의 모든 노드들까지 최단거리의 합에 대한 역수로 표현한다. 여기서,  $d(n, s)$ 는 노드  $n$ 과  $s$ 사이의 최단거리를  $M$ 은 집합  $N$ 의 원소 수를 의미한다.

$$C_c(n) = \frac{1}{|M|-1} \sum_{s \in N} d(n, s) \quad (3)$$

$$C_c(n) = \frac{1}{\sum_{s \in N} d(n, s)} \quad (4)$$

식(3)을 따르면  $C_c(n)$  값이 작은 노드가 중심성이 높은 것이고, 식(4)를 따르면 그 값이 큰 노드가 중심성이 높은 것이다.

closeness centrality가 좋은 노드는 네트워크의 모든 노드들까지 이르는 거리가 짧은 지점이기 때문에 이는 응급시설의 입지 선정 등에 활용될 수 있을 것이다. 그러나 네트워크의 중심에 위치하는 것만으로 연계성이 높다고 볼 수는 없기 때문에 이 역시 연계성 분석과는 다소 거리가 있다.

4) eigenvector centrality

Bonacich(1972)가 제안한 eigenvector centrality( $C_e$ )는 네트워크 내의 노드들 간의 상대적 중요성을 나타내는 척도이다(Borgatti, 2005). 이는 degree centrality를 확장한 개념으로 중요한 노드에 연결되어 있는 노드가 중요하지 않은 노드에 연결되어 있는 노드보다 중요성이 높다는 개념에 기반한다.

노드  $n$ 의 eigenvector centrality,  $C_e(n)$ 은 식(5)와 같이 정의된다.

$$C_e(n) = \frac{1}{\lambda} \sum_{s \in N} A_{ns} C_e(s) \tag{5}$$

식(5)를 벡터방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\lambda C_e = AC_e \tag{6}$$

여기서  $C_e$ 는  $C_e(n)$ ,  $\forall n$ 을 원소로 갖는 벡터이고  $A$ 는 네트워크의 인접행렬이다. 주어진 행렬  $A$ 에 대하여 식(6)을 만족하는 벡터  $C_e$ 와 스칼라  $\lambda$ 를 각각 eigenvector와 eigenvalue라 한다. 이와 같은 이유로  $C_e(n)$ 을 노드  $n$ 의 eigenvector centrality라 일컫는다. 식(5) 또는 식(6)을 만족시키는  $\lambda$ 와  $C_e$ 는 일반적으로 여러 개가 존재한다. 하지만 모든 노드의 eigenvector centrality를 비음수로 제한하게 되면(즉,  $C_e \geq 0$ ),  $\lambda$ 는 eigenvalue 값들 중 최대값을 가지며 이때  $C_e$  값이 노드들의 eigenvector centrality가 된다.(Newman, 2007)

개념상으로 eigenvector centrality가 대중교통 네트워크에서 정류장의 연계성과 가장 잘 부합된다. 정류장 간격이 균등하고 각 정류장을 연결하는 노선 단위구간의 속성이 매우 유사하며 두 노드를 연결하는 링크가 한 개인 도시철도 네트워크의 경우 eigenvector centrality를 각 역의 연계성을 나타내는 지표로 볼 수 있다. 그러나 복잡한 대중교통 네트워크에서는 노드와 노드를 연결하는 링크의 속성이 노선의 속성에 따라 상이하고, 버스 네트워크에서는 두 정류장을 연결하는 노선의 수만큼 서로 특성이 다른 링크가 존재하기 때문에 eigenvector centrality로 정류장의 연계성을 판단하는 데는 한계가 있다. 즉, 통행 밀도가 균일하여 정류장이 균등한 간격으로 분할되어 있고 노선별로 통행권이 확보되어 두 정류장을 연결하는 링크가 하나인 단일 위계 도시철도 네트워크의 연계성 분석에는

eigenvector centrality가 사용될 수 있으나 그렇지 않을 경우에는 적용하기 어렵다.

3. 연구방향 설정

1) 노선에 기반한 네트워크 분석 체계

일반 도로 네트워크는 실제 지형공간 상에 설치된 물리적 도로 시설을 노드-링크 체계로 모델링하는 반면 대중교통 네트워크는 지형공간 상에 설치된 물리적 시설인 정류장을 노드로 표현하고 이들 노드를 순차적으로 운행하는 차량의 운행궤적(노선)을 링크로 표현한다. 즉, 대중교통 네트워크에서 링크는 실제로 존재하는 물리적 시설이 아니라 단지 정해진 순서에 따라 운행하는 차량의 운행궤적일 뿐이다. 따라서 도로 네트워크에서는 회전제약이 없는 한, 한 노드에 연결된 링크들은 서로 연결되었다고 볼 수 있는 반면, 대중교통 네트워크에서는 한 노드에 연결된 링크라 할지라도 해당 링크가 속한 노선이 상이할 경우 서로 직접 연결되지 않는다. 이러한 점이 대중교통 네트워크가 도로 네트워크와 다른 가장 큰 차이점이며 네트워크 분석을 어렵게 하는 걸림돌이다.

대중교통 네트워크에서 하나의 노드를 내부 더미노드로 분할하고 각 분할된 더미노드를 환승 더미링크로 연결할 경우, 일반적인 도로 네트워크 분석기법을 대중교통 네트워크에 동일하게 적용할 수 있게 된다. 그러나 이러한 노드 분할을 통한 네트워크 확장방법은 네트워크의 규모가 커지게 되면 적용하는데 한계가 따르고, 더미노드와 더미링크의 특성이 일반 노드, 링크의 특성과 상이하기 때문에 또 다른 문제를 유발하게 된다. 따라서 본 연구에서는 일반적인 노드-링크 분석체계를 사용하지 않고, 노드-노선 분석체계를 사용하여 복합수단 대중교통 네트워크의 연계성을 분석하기로 한다.

2) 연계성 지수 개발

3장에서 자세히 다루어지겠지만 대중교통 네트워크의 연계성 개념 정립은 네트워크의 구성요소인 노드의 연계성에 대한 정의로부터 출발한다. 노드의 연계성을 정의하는데 본 연구는 사회 네트워크 이론에서 사용되는 노드의 중심성을 활용한다. 앞서 논의한 바와 같이 네트워크에서 노드의 중심성을 평가하는 대표적인 4개의 지표 모두 대중교통 네트워크 내 노드의 연계성을 직접 표현하기에는 무리가 있다. 따라서 본 연구에서는 개념적으

로 단순한 degree centrality 지표를 사용하되 복합수단 대중교통 네트워크에 적합하게 degree를 재정의하여 노드의 연계성을 나타내는 지수를 개발하고자 한다.

### III. 복합수단 대중교통 네트워크 연계성 분석 모형

#### 1. 대중교통 연계성의 개념 정립

##### 1) 대중교통 연계성의 평가대상

일반적으로 “대중교통 연계성이 좋다”라고 말하는 것은 그 대상이 무엇인지가 명시되지 않았기 때문에 막연하게 들린다. 이와 달리 “서울역의 대중교통 연계성이 좋다”, “서울 지하철 2호선의 대중교통 연계성이 좋다”, “종로의 대중교통 연계성이 좋다”라는 말은 연계성의 대상이 되는 지점, 노선, 지역이 명시되기 때문에 보다 구체적인 의미가 전달된다. 대중교통 연계성에 대한 정의가 명확하게 내려지지 않았기 때문에 이러한 말들도 여전히 그 의미가 애매모호하기는 마찬가지이지만, 일단은 대중교통 연계성이 지점, 노선, 또는 지역을 대상으로 평가될 수 있음을 알 수 있다. 대중교통 연계성의 평가 대상을 지점, 노선, 지역의 세 가지로 볼 경우, 지점은 대중교통 네트워크 내 정류장을 의미하고, 노선은 정류장의 순차적 연결이고, 지역은 해당 지역 내에 존재하는 정류장의 집합이기 때문에 결과적으로 대중교통 연계성 평가의 최소 단위는 지점에 해당하는 정류장이 된다.

##### 2) 대중교통 연계성의 평가주체 및 평가내용

대중교통 연계성의 정의를 내리기 위해서는 우선 연계성을 평가하는 주체를 설정해야 한다. 대중교통 연계성은 대중교통 서비스수준을 평가하는 하나의 항목에 해당하고 대중교통 서비스수준 평가는 이용자의 관점에서 수행되는 것이 바람직하기 때문에 대중교통 연계성의 평가 역시 대중교통 이용자의 관점에서 평가되어야 한다.

대중교통 이용자는 크게 차외승객과 차내승객으로 구분될 수 있다. 차외승객은 정류장에서 대중교통 서비스를 제공받기 위해 대기하는 이용자로, 1차적으로 자신이 가고자 하는 목적지까지 대중교통 노선이 연결되어 있는지를 평가할 것이고(서비스권역), 2차적으로 그 노선이 자주 운행하여 정류장에서 자신의 대기시간을 감소시켜

줄 수 있는지(운행회수 또는 배차간격), 통행속도가 빨라 목적지까지의 통행시간을 감소시켜 줄 수 있는지(통행속도 또는 통행시간), 차량의 용량이 충분하여 많은 사람들이 동시에 그 노선을 이용하더라도 자신이 그 노선의 서비스를 제공받을 수 있는지(차량용량)를 평가할 것이다. 즉, 1차 서비스평가 내용은 물리적 연결성이 되고, 2차 서비스평가 내용은 연결강도가 된다.

차내승객은 승차한 대중교통 노선의 서비스를 제공받고 있는 이용자로, 해당 노선이 자신이 가고자 하는 목적지까지 운행하는 경우에는 목적지까지 얼마나 빨리 도착하는지(통행속도 또는 통행시간)를 평가할 것이고, 해당 노선이 자신이 가고자 하는 목적지까지 운행하지 않을 경우에는 1차적으로 자신이 승차하고 있는 노선이 자신의 목적지까지 운행하는 노선의 서비스가 제공되는 지점을 서비스하는지(서비스권역)를 평가하고, 2차적으로 자신이 현재 승차하고 있는 노선의 통행속도와 환승 이동시간, 연계노선의 대기시간(운행회수 또는 배차간격), 통행속도, 차량용량 등을 평가할 것이다.

이와 같이 차외승객과 차내승객 모두를 합한 대중교통 이용자들이 연계성을 평가할 때 고려하는 요소는 노선의 서비스권역, 운행회수 또는 배차간격, 통행속도, 차량용량으로 요약된다. 서비스권역이 넓은 노선일수록 보다 많은 정류장 또는 지역을 연계하므로 연계성이 높다. 또한 동일한 기종점을 연결하더라도 두 지점을 연결하는 노선의 운행회수가 많아 배차간격이 짧고, 통행속도가 빨라 통행시간이 짧고, 차량용량이 커서 보다 많은 승객을 서비스하는 노선일수록 연계성이 높다. 즉 본 연구에서 고려하는 대중교통 네트워크에서의 연계성이란 물리적 연결성과 연결강도를 복합적으로 평가하는 것이다.

##### 3) 대중교통 연계성의 정의

앞에서 살펴본 대중교통 연계성의 평가대상과 평가주체 및 평가내용을 기반으로 대중교통 연계성을 정류장, 노선, 지역(지형공간의 요소로는 점, 선, 면이 됨)으로 구분하여 다음과 같이 정의할 수 있다.

- [점] 정류장의 대중교통 연계성이란, 해당 정류장에 도착한 이용자가 해당 정류장을 서비스하는 노선을 통해 네트워크 내 타 정류장으로 이동할 수 있도록 제공되는 대중교통 시스템의 서비스수준을 나타내는 척도

- [선] 노선의 대중교통 연계성이란, 해당 노선에 탑승한 이용자가 해당 노선을 통해 네트워크 내 타 정류장으로 이동할 수 있도록 제공되는 대중교통 시스템의 서비스수준을 나타내는 척도
- [면] 지역의 대중교통 연계성이란, 해당 지역 내의 이용자가 해당 지역을 서비스하는 대중교통 노선을 통해 네트워크 내 타 정류장으로 이동할 수 있도록 제공되는 대중교통 시스템의 서비스수준을 나타내는 척도

2. 노선의 연계강도

1) 대중교통 노선의 평가항목 선정

앞 절에서 언급한 바와 같이 대중교통 네트워크에서 연계성 분석의 기본단위는 정류장이 된다. 그런데 정류장의 속성은 해당 정류장을 서비스하는 노선들의 속성에 의해 결정된다. 따라서 대중교통 네트워크의 연계성 분석은 노선의 속성분석에서부터 시작된다.

대중교통 노선은 2장에서 언급한 바와 같이 서로 상이한 차량특성, 노선특성, 운행특성을 갖는다. 서로 다른 어떤 노선도 세 가지 특성이 모두 동일할 수는 없다. 보다 상세한 특성요소는 다음과 같다.

- 차량특성: 차량의 용량, 주행속도, 가감속 능력
- 노선특성: 노선의 연장, 전용차로 유무, 서비스하는 정류장의 순차적 연결순서, 서비스하는 정류장의 평균 간격

- 운행특성: 운행시간, 배차회수 및 배차시각, 평균 배차간격

대중교통 노선의 특성요소들을 앞에서 살펴본 이용자 관점의 평가내용들과 연결하여 대중교통 노선의 연계성을 평가할 수 있는 평가항목을 <그림 1>과 같이 서비스권역, 수송용량, 통행속도의 세 가지로 도출하였다.

2) 대중교통 노선의 평가지표 선정

대중교통 노선이 서비스하는 서비스권역을 나타낼 수 있는 평가지표로는 노선의 연장과 정류장 개수를 생각할 수 있다. 일반적으로 동일 위계 노선망에서 노선의 연장과 정류장 개수는 강한 양의 상관관계를 갖는다. 그러나 위계가 다른 노선들의 경우 노선의 연장과 정류장 개수는 서로 비례하지 않을 수 있다.

일반적으로 위계가 높은, 즉 통행속도가 빠르고 운영비용이 큰 노선일수록 하나의 정류장이 넓은 지역을 서비스하여 정류장 간격이 길어지기 때문에 정류장 개수보다 노선의 연장이 서비스권역을 나타내는데 더 적합하다. 반대로 대중교통 노선이 임야나 하천과 같이 이용자가 전혀 없는 지역을 경유할 경우 이러한 지역의 노선연장을 서비스권역으로 보기 힘들다. 즉 개발밀도가 불균등한 지역을 서비스하는 노선의 경우에는 노선연장보다 정류장 개수가 대중교통 노선의 서비스권역을 더 잘 나타낸다고 볼 수 있다.

복합수단 대중교통 네트워크에서는 이러한 개발밀도의 불균등으로 인해 노선연장이 노선의 실제 서비스권역을 왜곡하여 표현하는 정도보다, 노선의 위계에 따른 정류장의 서비스권역 차이가 크기 때문에 노선의 연장이 노선의 서비스권역을 나타내는 지표로 정류장의 개수보다 더 적합하다. 여기서 노선의 연장은 노선의 전체 연장을 나타내는 것이 아니라 해당 정류장에서부터 노선의 종점까지의 연장을 나타낸다. 즉, 해당 정류장에서 노선을 통해 이동할 수 있는 권역의 크기를 나타낸다.

차량의 단위 용량에 운행회수를 곱하면 노선의 수송용량이 산출된다. 즉, 수송용량은 차량의 단위 용량과 운행회수를 동시에 표현할 수 있는 장점이 있다. 그러나 적은 용량의 차량을 여러 번 운행하는 경우와 대용량의 차량을 적은 회수로 운행하는 경우를 구분하지 못하는 단점이 있다. 일반적으로 이용자의 관점에서는 소용량의 차량을 여러 번 운행하는 경우가 대기시간 측면에서 보다 유리할 것이라 생각한다. 그러나 100명의 승객을 10의



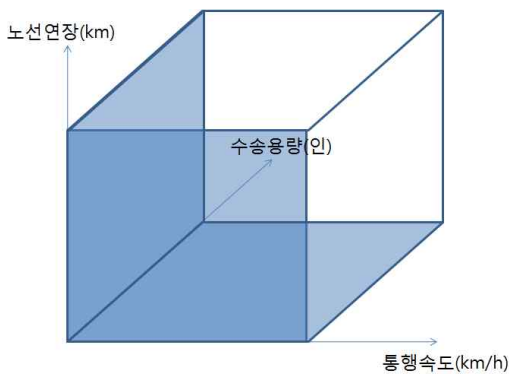
<그림 1> 노선 특성요소와 평가항목

용량을 가진 차량으로 1분 간격으로 10회 운행할 경우 100명의 평균 대기시간은 4.5분이 되지만, 100의 용량을 가진 차량을 1회 운행할 경우 100명의 평균 대기시간은 0분으로 오히려 대용량의 차량을 적은 회수로 운행하는 것이 이용자 관점에서 보다 유리할 수도 있다. 즉, 이는 이용수요와 운영 방식에 따라 달라지는 문제이기 때문에 일반적인 결론을 내리기는 힘들다. 따라서 본 연구에서는 단위 시간, 1일 동안 수송할 수 있는 총 수송용량을 평가지표로 선정한다.

통행속도 또는 통행시간은 이동성을 나타내는 대표적인 지표이지만 동시에 연계성의 한 측면으로 볼 수 있다. 이동성이 높은 대중교통 노선이 두 지점을 서비스하는 것이 두 지점의 연계성을 향상시키는 것으로 볼 수 있기 때문이다. 통행시간은 통행속도와 통행거리를 동시에 표현할 수 있는 지표로 공간적 거리를 시간적 거리로 환산해주는 좋은 지표이다. 그러나 앞에서 서비스권역을 나타내는 지표로 노선의 연장을 사용하였기 때문에 통행거리가 반영된 통행시간을 사용하게 되면 통행거리가 중복하여 반영된다. 따라서 본 연구에서는 통행속도를 평가지표로 선정한다.

3) 대중교통 노선의 연계강도

위에서 선정된 대중교통 노선의 평가지표인 노선연장, 수송용량, 통행속도를 축으로 하는 3차원 공간을 가정할 때 <그림 2>와 같이 이들 세 가지 평가지표값으로 이루어지는 육면체를 생각해보자. 본 연구에서는 이 육면체의 부피를 노선의 연계강도로 정의하며 이 연계강도는 연계성 분석을 위한 대중교통 노선의 기본속성이 된다. 구체적으로 정류장  $s$ 를 서비스하는 노선  $l$ 의 연계강도  $T_l^s$ 은 식(7)과 같이 계산된다.



<그림 2> 노선의 연계강도

$$T_l^s = \alpha D_l \times \beta V_l \times \gamma L_l^s \tag{7}$$

- 여기서,  $D_l$  : 노선  $l$ 의 수송용량
- $V_l$  : 노선  $l$ 의 통행속도
- $L_l^s$  : 노선  $l$  내의 정류장  $s$ 에서 노선의 종점까지의 연장
- $\alpha$  : 수송용량 규모 조정계수
- $\beta$  : 통행속도 규모 조정계수
- $\gamma$  : 노선연장 규모 조정계수

식(7)에서 노선  $l$ 의 수송용량  $D_l$ 과 통행속도  $V_l$ 는 노선의 운행 중 일정한 것으로 가정하므로 정류장  $s$ 의 함수가 아니다.

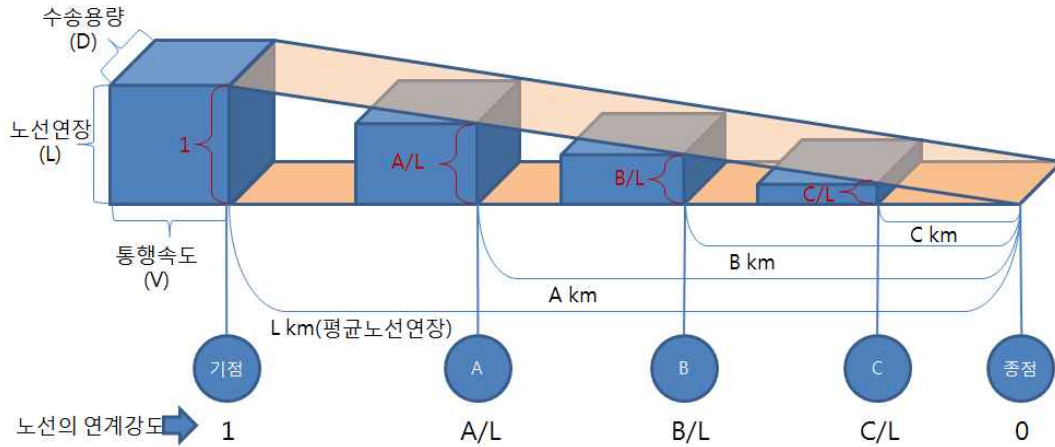
수송용량, 통행속도, 노선연장에 대한 규모 조정계수는 노선 간 연계강도의 비교를 용이하게 하기 위하여 사용된다. 만약 평균적인 수송용량, 통행속도 및 노선연장을 가지는 시내버스 노선의 기점에서의 연계강도를 1로 설정하여 연계성 분석을 위한 단위 연계강도로 삼는 경우, 세 가지 규모 조정계수는 시내버스의 평균 수송용량, 통행속도, 노선연장의 역수가 된다. 즉, 일반적인 시내버스의 평균적인 수송용량, 통행속도, 노선연장을 각각  $D, V, L$ 이라 하면 정류장  $s$ 에서의 노선  $l$ 의 연계강도  $T_l^s$ 은  $\frac{D_l}{D} \times \frac{V_l}{V} \times \frac{L_l^s}{L}$ 로 주어진다. 노선의 연계강도를 이와 같이 표현하게 되면 모든 대중교통 노선이 평균적인 시내버스의 연계강도에 비해 몇 배의 연계강도를 갖는지를 (즉, 몇 개의 육면체로 표현되는지를) 직관적으로 비교할 수 있다.

<그림 3>과 같이 일반적인 시내버스의 평균적인 수송용량, 통행속도, 노선연장을 갖는 노선에서 정류장별 노선의 연계강도를 살펴보면, 기점에서의 노선의 연계강도는 1이 되고 종점에서의 노선의 연계강도는 0이 된다. 또한 노선의 중간에 있는 정류장 A, B, C에서의 노선의 연계강도는 각각  $A/L, B/L, C/L$ 이 된다.

3. 연계성 지수

1절에서 대중교통 연계성을 정류장, 노선, 지역으로 구분하여 개념을 정립하였다. 여기서는 앞 절에서 정의된 노선의 연계강도  $T_l^s$ 을 이용하여 정류장, 노선, 지역의 연계성을 정량적 지수로 제시한다.





<그림 3> 노선 내 정류장별 연계강도

1) 정류장의 연계성 지수

노선의 연계강도는 노선연장, 수송용량, 통행속도로 구성된 육면체의 부피로 계산되기 때문에 큐빅 쌓기와 같이 합산이 가능하다. 정류장의 연계성 지수는 해당 정류장을 서비스하는 노선들의 연계강도의 합으로 정의된다. 즉, 단위 연계강도를 갖는 노선 하나가 서비스하는 정류장의 연계성 지수는 1이 되고, 두 개의 노선이 서비스하는 정류장의 연계성 지수는 2가 된다. 정류장  $s$ 의 연계성 지수(connectivity index)  $CI(s)$ 는 식(8)과 같이 계산된다.

$$CI(s) = \sum_{l \in P} T_l^\circ \delta_l^\circ \quad (8)$$

- 여기서,  $T_l^\circ$  : 대중교통 노선  $l$ 의 정류장  $s$ 에서의 연계강도
- $\delta_l^\circ$  : 대중교통 노선  $l$ 이 정류장  $s$ 를 서비스하면 1, 아니면 0
- $P$  : 대중교통 노선 집합

식(8)의 연계성 지수는 개념적으로 degree centrality와 유사하다. 하지만 degree centrality가 단순히 노드 간 연결여부만 고려하는데 비해, 식(8)은 노선의 연계강도에 기반을 두고 있어 degree centrality로 표현하지 못하는 노선의 속성 차이를 반영하고 있다. 즉, 식(8)의 연계성 지수는 복잡수단 대중교통 네트워크에 적합하게 변형된 degree centrality로 볼 수 있다.

2) 노선의 연계성 지수

노선의 대중교통 연계성은 앞서 정의한 바와 같이 해당 노선에 탑승한 이용자가 해당 노선을 통해 네트워크 내 타 정류장으로 이동할 수 있도록 제공되는 대중교통 시스템의 서비스수준을 나타내는 척도이다. 따라서 기점을 제외한 노선이 경유하는 정류장들의 연계성을 종합한 값이 노선의 대중교통 연계성이 된다. 노선이 경유하는 정류장들의 연계성 지수를 단순 합계한 값을 노선의 연계성 지수로 사용할 경우 노선의 연계성 지수는 노선이 경유하는 정류장의 수에 비례하게 되는데, 정류장 수와 노선의 연계성이 일정 정도 양의 상관관계를 갖기는 하지만 복잡수단 대중교통 네트워크에서는 항상 그렇다고 볼 수는 없다. 또한 노선이 경유하는 정류장들의 연계성 지수를 합한 값을 사용하게 되면 위계가 상이한 노선들의 비교가 어려워지는 문제가 있다. 따라서 노선의 연계성 지수는 노선이 경유하는 정류장의 연계성 지수의 평균값을 사용하는 것이 바람직하다. 따라서 노선  $l$ 의 연계성 지수  $CI(l)$ 는 식(9)와 같이 정의된다.

$$CI(l) = \frac{1}{|S_l| - 1} \sum_{s \in S_l, s \neq s_o} CI(s) \quad (9)$$

- 여기서,  $CI(s)$  : 정류장  $s$ 의 연계성 지수
- $S_l$  : 노선  $l$ 이 경유하는 정류장 집합
- $s_o$  : 노선  $l$ 의 기점 정류장

3) 지역의 연계성 지수

지역의 연계성은 해당 지역 내의 이용자가 해당 지역

을 서비스하는 대중교통 노선을 통해 네트워크 내 타 정류장으로 이동할 수 있도록 제공되는 대중교통 시스템의 서비스수준을 나타내는 척도로 정의하였다. 지역의 연계성은 해당 지역을 서비스하는 노선과 정류장이 많을수록 좋다고 볼 수 있다. 따라서 지역  $R$ 의 연계성 지수  $CI(R)$ 는 식(10)과 같이 해당 지역 내에 존재하는 모든 정류장의 연계성 지수의 합으로 정의될 수 있다.

$$CI(R) = \sum_{s \in S_R} CI(s) \quad (10)$$

여기서,  $CI(s)$  : 정류장  $s$ 의 연계성 지수

$S_R$  : 지역  $R$ 에 존재하는 정류장 집합

식(10)과 같이 지역 내에 존재하는 모든 정류장의 연계성 지수를 합한 값은 지역 간 대중교통 연계성을 상대적으로 비교하기에는 용이하다. 그러나 이는 지역 간 상대적 수치일 뿐, 해당 지역의 면적이나 통행인구 등을 고려한 절대적 서비스수준에 대한 정보를 제공하지 못한다. 지역별 면적이나 통행인구 등을 고려하기 위해서는 지역의 연계성 지수  $CI(R)$ 을 해당 지역의 면적이나 통행인구 등으로 나눈 단위 면적당 또는 통행인구당 연계성 지수를 사용해야 한다. 지역의 대중교통 연계성의 절대적 지수  $\overline{CI}(R)$ 는 식(11)과 같이 산출된다.

$$\overline{CI}(R) = \frac{1}{K_R} CI(R) \quad (11)$$

여기서,  $CI(R)$  : 지역  $R$ 의 연계성 지수

$K_R$  : 지역  $R$ 의 지역계수

지역계수  $K_R$ 로는 면적, 인구, 통행수 등 다양한 지표들이 고려될 수 있으나 각 지표들마다 장단점이 있으므로 반드시 어떤 지표를 사용해야 한다고 말하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 고려 가능한 지표들의 장단점만을 언급하기로 한다.

면적은 시간에 따른 변화가 거의 없고 정확한 측정지표이지만, 지역별 개발 정도와 개발 밀도를 고려하지 못하므로 해당 지역의 통행 특성을 나타내기에 적당하지 못하다. 통행수 또는 통행인구는 지역의 통행특성을 잘 반

영하고 있다고 볼 수 있으나 인구수를 기반으로 추정된 지표이기 때문에 정확성이 떨어지는 단점이 있다. 해당 지역의 인구수는 통행특성을 정확하게 나타내지는 못하지만 추정지표가 아닌 관측지표라는 장점을 갖는다. 해당 지역의 통행 특성을 보다 정확하게 반영하기 위해서는 거주인구보다 활동인구를 사용하는 것이 바람직하지만, 활동인구는 통행수와 통행인구와 같이 추정된 값이므로 정확도가 떨어지는 단점이 있다.

#### 4. 환승센터의 연계성 분석

2009년 7월에 개정된 ‘국가통합교통체계효율화법’에서는 환승센터를 “교통수단 간의 연계교통 및 환승활동을 원활하게 할 목적으로 일정 환승시설이 상호 연계성을 갖고 한 장소에 집합되어 있는 시설”로 정의하고 있다. 즉, 환승센터란 서로 다른 정류장의 집합으로 볼 수 있다. 이러한 환승센터의 적절한 입지선정과 효율적인 운영을 위해 환승센터의 연계성 및 서비스수준에 대한 분석이 최근 강조되고 있지만 분석을 위한 방법론은 현재까지 제시된 바 없다. 여기서는 앞에서 개발된 정류장의 연계성 지수를 토대로 환승센터의 연계성 지수를 산정하는 방법론을 제시하고자 한다.

##### 1) 이용자수용비율

이용자수용비율이란 정류장까지 접근하는데 소요되는 시간에 따른 해당 정류장을 이용하는 이용자의 비율을 나타낸다. 직관적으로 정류장까지의 접근 시간이 길어질수록 해당 정류장의 이용자수용비율은 감소한다. 예를 들어 김점산과 권용석(2005)은 버스 정류장까지 접근하는데 소요되는 도보시간에 따른 이용자수용비율을 식(12)와 같이 추정하였다.

$$y = 1.3189 \exp(-0.0872x) \quad (12)$$

여기서,  $x$  : 도보시간(분)

$y$  : 이용자수용비율(%)

식(12)에 의하면 정류장까지의 접근시간이 3분이내 이면 모든 이용자가 해당 정류장을 이용하고<sup>1)</sup>, 접근시

1) 이용자수용비율은 100%가 최대치고 정류장으로부터 거리가 멀어짐에 따라 그 값이 작아져 0으로 수렴하게 된다. 김점산과 권용석(2005)이 제시한 이용자수용비율 모형인 식(12)는 정류장으로부터의 거리가 3분 이내일 경우 이용자수용비율이 100%를 넘는 값을 산출하게 되는 오류를 갖고 있다. 그러나 100%가 넘는 값을 100%로 절사할 경우 모형의 기본 취지를 해치지 않으므로 본 연구에서는 모형의 수정 없이 원 모형을 그대로 이용하기로 한다.

간이 10분이면 이용자 중 55%만이 해당 정류장을 이용하고 나머지 45%는 통행을 포기하거나 승용차 또는 택시를 이용하는 등 다른 통행수단을 선택한다고 볼 수 있다. 즉, 서로 다른 정류장까지의 이동시간이 3분 미만인 경우 두 정류장은 동일한 정류장으로 볼 수 있음을 의미하고, 반대로 생각할 경우 환승 이동시간이 3분 이상 걸리는 정류장들은 서로 동일한 정류장으로 보기 힘들다는 뜻이 되기도 한다.

정류장까지의 거리에 따른 이용자수용비율은 지역별로 상이할 수 있는데, TCRP Report 100(2003)에 제시된 자료에 의하면 북미의 이용자들의 거리에 따른 이용자수용비율이 우리나라 이용자들보다 작게 나타난다. 이러한 대중교통 이용자의 수용비율은 승용차 위주의 통행특성이 강한 지역일수록 낮게 나타나고, 대중교통 위주의 통행특성이 강한 지역일수록 높게 나타난다.

2) 환승센터의 연계성 지수

환승센터가 정류장들의 집합이기 때문에 환승센터의 연계성 지수를 정류장들의 연계성 지수의 합으로 생각할 수 있다. 하지만 환승센터에서는 환승 시간 또는 거리에 따라 이용자들이 다른 대중교통 수단으로의 환승을 포기하는 경우가 있을 수 있으므로 환승센터의 연계성 지수는 환승센터에 속한 정류장들의 연계성 지수를 그대로 합산한 것보다 작은 값을 가져야 하는 것이 논리적으로 타당하다. 이를 반영하기 위하여 본 연구에서는 정류장 간의 접근시간에 따른 이용자수용비율을 적용한다. 즉, 환승센터의 연계성 지수는 환승센터 내 정류장들 간의 거리에 따라 이용자수용비율만큼 줄어든 각 정류장의 연계성 지수의 합으로 정의되며 식(13)과 같이 계산된다.

$$CI_{TC} = \frac{1}{|S_{TC}|-1} \sum_{v \in S_{TC}} \sum_{s \in S_{TC}, s \neq v} CI(s)y_{vs} \quad (13)$$

- 여기서,  $CI_{TC}$  : 환승센터의 연계성 지수
- $CI(s)$  : 정류장  $s$ 의 연계성 지수
- $S_{TC}$  : 환승센터에 속한 정류장 집합
- $y_{vs}$  : 정류장  $v-s$ 간 이용자수용비율(%)

식(13)에서  $|S_{TC}|-1$ 로 나누는 이유는 계산에서 각 정류장의 연계성 지수가  $|S_{TC}|-1$ 회씩 고려되기 때문이다.

IV. 사례분석

본 연구에서 제시한 대중교통 연계성 평가 모형의 현실 적용성과 결과의 적정성을 검증하기 위해 서울역을 사례로 분석하였다. <그림 4>에서 보는 바와 같이 서울역은 지하철 1호선, 4호선 및 버스 환승정류장과 연계되어 있다.

<표 1>은 서울역, 지하철 1, 4호선 및 버스 환승정류장의 실제 운행노선자료를 통해 각 정류장의 연계성 지수를 산출한 결과를 보여준다. 서울역의 연계성 지수는 699.9, 지하철 1호선, 4호선, 버스 환승정류장의 연계성 지수는 각각 210.9, 124.7, 70.3으로 산출되었다. 즉, 서울역은 서울시의 평균적인 시내버스 700개 노선만큼의 연계강도를 갖고, 지하철 1호선, 4호선 및 버스 환승정류장도 동일하게 해석할 수 있다. 버스 환승정류장의 운행 노선이 68개인데 연계성 지수가 70.3으로 산출된 것은 평균적인 시내버스보다 연계강도가 높은 광역과 직행좌석버스의 영향으로 해석된다. 지하철 1호선이 노선연장이 길고 운행회수가 많아 지하철 4호선보다 연계성 지수가 높게 산출되었다. 또한 새마을호와 무궁화호는 노선연장과 통행속도가 높음에도 불구하고 운행회수가 매우 적어 연계성 지수가 버스 환승정류장과 비슷하게



그림출처: [Topsis]서울시교통정보센터

<그림 4> 서울역 사례

<표 1> 서울역의 연계성 지수 산출 결과

구분		운행회수(회/일)	노선연장(km)	통행속도(kph)	승차정원(명)	수송용량(명/일)	연계성 지수		
철도 <sup>주1)</sup>	KTX	행신	4	15	42	935	3,740	0.5	
		대전	1	166	169	935	935	5.4	
		동대구	14	293	153	935	13,090	121.3	
		부산	36	409	152	935	33,660	432.5	
	소계							559.7	
	새마을호	마산	3	427	87	500	1,500	11.5	
		포항	2	430	82	500	1,000	7.3	
		부전	6	438	67	500	3,000	18.3	
		부산	5	442	90	500	2,500	20.6	
		해운대	1	452	84	500	500	3.9	
		소계							61.7
	무궁화호	대전	2	166	81	500	1,000	2.8	
		동대구	4	326	78	500	2,000	10.6	
		마산	1	427	79	500	500	3.5	
		부전	1	438	65	500	500	2.9	
		부산	14	442	80	500	7,000	51.0	
		해운대	1	452	77	500	500	3.6	
		순천	1	572	70	500	500	4.1	
		소계							78.5
	<b>철도 합계</b>							<b>699.9</b>	
	지하철	1호선 (상행)	청량리	79	7	30	1,600	126,400	5.5
			동묘앞	14	5	30	1,600	22,400	0.7
			성북	60	12	30	1,600	96,000	7.1
창동			11	15	30	1,600	17,600	1.6	
의정부			41	25	30	1,600	65,600	10.2	
양주			30	30	30	1,600	48,000	8.9	
동두천			24	47	30	1,600	38,400	11.2	
소요산			38	50	30	1,600	60,800	18.9	
1호선 (하행)		구로	14	11	30	1,600	22,400	1.5	
		인천	198	38	30	1,600	316,800	74.6	
		병점	21	48	30	1,600	33,600	10.0	
		천안	25	96	30	1,600	40,000	23.8	
신창		32	116	30	1,600	51,200	36.8		
<b>1호선 합계</b>							<b>210.9</b>		
4호선 (상행)		한성대입구	2	6	30	1,600	3,200	0.1	
		당고개	247	19	30	1,600	395,200	46.6	
		사당	109	10	30	1,600	174,400	10.8	
		남태평	1	11	30	1,600	1,600	0.1	
		산본	2	28	30	1,600	3,200	0.6	
		안산	37	45	30	1,600	59,200	16.5	
4호선 (하행)		오이도	97	52	30	1,600	155,200	50.0	
		<b>4호선 합계</b>							<b>124.7</b>
버스 <sup>주2)</sup>		공항(2개노선)	30	60	39	45	2,700	1.3	
	빨강(광역)(5개노선)	134	55	22	45	30,150	7.5		
	적행좌석(12개노선)	98	65	23	45	52,920	16.4		
	파랑(간선)(40개노선)	137	31	20	55	301,400	38.6		
	초록(지선)(9개노선)	151	22	19	55	74,745	6.5		
	<b>버스 합계</b>							<b>70.3</b>	

주) 연계성 지수의 규모 조정계수는 서울시 전체 버스노선의 평균값을 사용함  
 수송용량 규모 조정계수  $\alpha=1/6545$ 명/일 (55명/회×119회/1일)  
 통행속도 규모 조정계수  $\beta=1/22$ kph, 노선연장 규모 조정계수  $\gamma=1/33.6$ km  
 주1) 새마을호와 무궁화호의 승차정원은 차량편성에 따라 상이하여 평균적인 값을 일괄 적용함  
 주2) 각 노선유형별 평균값 적용

<표 2> 서울역 환승센터 연계성 지수 계산 결과

<i>v</i>	<i>s</i>	<i>CI(s)</i>	이동시간 (분)	이용자수용 비율(%)	<i>CI(s)y<sub>vs</sub></i>
서울역	1호선	210.9	5	85	179.9
	4호선	124.7	5	85	106.4
	버스	70.3	4	93	65.4
1호선	서울역	699.9	5	85	596.9
	4호선	124.7	6	78	97.5
	버스	70.3	2	100	70.3
4호선	서울역	699.9	5	85	596.9
	1호선	210.9	6	78	164.9
	버스	70.3	3	100	70.3
버스	서울역	699.9	4	93	651.3
	1호선	210.9	2	100	210.9
	4호선	124.7	3	100	124.7

$$CI_{TC} = \frac{1}{|S_{TC}| - 1} \sum_{v \in S_{TC}} \sum_{s \in S_{TC}, s \neq v} CI(s)y_{vs} = 978.5$$

$$\frac{CI_{TC}}{\sum_{s \in S_{TC}} CI(s)} = \frac{978.5}{1105.8} = 0.885$$

산출되었다. 이와 같은 분석 결과는 본 연구에서 정의한 연계성의 개념을 잘 반영하고 있는 것으로 판단된다.

<표 2>는 서울역, 지하철 1, 4호선 및 버스 환승정류장 전체를 하나의 환승센터로 볼 경우 이 환승센터의 연계성 지수를 산출한 결과이다. 환승센터에 속한 4개 정류장들의 연계성 지수의 단순합계는 1105.8(699.9+210.9+124.7+70.3)이나 식(12)의 이용자수용비율을 이용하여 식(13)에 따라 계산된 환승센터의 연계성 지수는 978.5이다.

환승센터의 연계성 지수를 환승센터에 속한 정류장들의 연계성 지수의 단순합계로 나누게 되면 (즉,  $CI_{TC} / \sum_{s \in S_{TC}} CI(s)$ ) 환승 이동시간으로 인해 감소된 연계성 지수의 비율을 산출할 수 있다. 이 비율값을 통해 환승센터의 서비스수준을 산정할 수도 있는데 이 예제에서는 <표 2>와 같이 88.5%의 값이 산출된다. 만약 서비스수준 A, B, C, D, E의 기준치가 각각 90%, 80%, 70%, 60%, 50%라면 예시에 나타난 환승센터의 서비스수준은 B가 되는 것이다. 지하철 1호선과 4호선의 환승거리가 다소 길지만 전체적으로는 환승 서비스수준이 양호한 것으로 판단할 수 있다.

### V. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 복합수단 대중교통 네트워크의 연계성을 분석할 수 있는 모형을 개발하였다. 본 연구에서는 노드-노선 기반의 대중교통 네트워크 분석체계 하에서 새롭게 개발한 연계성 평가지표를 통해 지형공간의 3대 요소인 점, 선, 면에 해당하는 정류장, 노선, 지역의 연계성 분석 모형을 제시하였고 추가적으로 점의 특정한 집합인 환승센터의 연계성을 평가하는 방법론을 제시하였다.

서울역을 대상으로 한 사례분석 결과 본 연구에서 개발한 연계성 평가 모형은 복합수단 대중교통 네트워크의 특성을 제대로 반영할 수 있으며 정의한 개념에 따라 적합한 연계성 지수를 산출하는 것을 확인할 수 있었다.

하지만 본 논문의 연계성 평가 모형은 연계성 지수에 영향을 미치는 노선연장, 수송용량, 통행속도의 상대적 중요도 차이를 고려하지 못하는 단점이 있어, 예를 들면 장거리를 지속적으로 1회 운행하는 노선과 단거리를 고속으로 여러 번 운행하는 노선 중 어떤 노선의 연계성 지수가 높은지를 판단하는데 한계가 있다.

연계성 평가 모형을 적절히 활용하기 위해서는 정확한 노선연장, 수송용량, 통행속도 데이터가 필요하다. 수송용량은 단순히 차량 정원과 운행회수의 곱으로 비교적 쉽게 산출된다. 하지만 노선연장은 모든 노선별로 지도에서 측정해야 하는 어려움이 있다. 또한 평균 통행속도는 각 노선별 운행결과를 통해 산출해야 정확한 값이 산출될 수 있으나 이를 위해서는 방대한 자료를 수집하여 분석해야 하는 어려움이 있다. 즉, 세 가지 속성값 산출을 위해 요구되는 노력의 정도가 매우 상이한데 이들 값들이 결과에 미치는 영향은 노력의 정도와 반드시 비례하지는 않는다. 따라서 각 속성값의 정밀도가 결과에 미치는 영향을 고려하여 각 속성값 산출 방법을 단순화시키는 것이 모형의 활용도를 높일 수 있을 것이다. 예를 들어 철도와 지하철의 연계성 지수가 몇 백 단위로 산출되는 반면 시내버스의 연계성 지수가 1단위 또는 그 이하로 산출되는 경우, 상대적으로 크기가 매우 작은 시내버스의 연계성 지수 산출을 위해 방대한 자료 수집과 계산 과정을 소비하는 대신에 단순히 모든 시내버스 노선의 연계성 지수를 1로 고정하는 방안도 고려해 볼 수 있다.

위에서 언급한 모형의 한계와 데이터 수집의 어려움에도 불구하고 본 연구에서 개발한 복합수단 대중교통 네트워크의 연계성 분석 모형은 위계구조를 갖는 대규모 복합수단 대중교통 네트워크의 연계성 분석을 네트워크

확장 없이 수행 가능한 장점이 있다. 또한 교통 네트워크에서 노드의 속성을 분석한 점에서 교통 네트워크 분석의 새로운 방향을 제시하고 있다.

본 연구에서 고려한 노선의 서비스권역은 환승을 통해 연계되는 지점들까지 반영하지는 못하고 있다. 환승을 통해 연계되는 2차, 3차 서비스권역까지 고려하는 연계성 지수에 대한 연구는 향후 과제로 남기도록 한다. 환승센터의 서비스수준 산정을 위해서는 각 서비스수준의 기준치 설정이 선행되어야 하고, 이는 이용자의 만족도 조사를 통해 추정되어야 하기 때문에 환승센터의 서비스수준에 대한 상세한 분석도 향후 연구과제로 남긴다.

알림 : 본 논문은 대한교통학회 제62회 학술발표회 (2010.2.20)에서 발표된 내용을 수정·보완하여 작성된 것입니다.

## 참고문헌

1. 김점산·권용석(2005), “이용자 속성을 고려한 버스 서비스권역 결정모형의 개발”, 대한교통학회지, 제23권 제3호, 대한교통학회, pp.149~159.
2. Bonacich, P.(1972), “Factoring and weighting approaches to status scores and clique identification”, Journal of Mathematical Sociology, 2, pp.113~120.
3. Borgatti, S.P.(2005), “Centrality and network flow”, Social Networks, 27, pp.55~71.
4. Borgatti, S.P., Everett, M.G.(1997), “Network analysis of 2-mode data”, Social Networks, 19, pp.243~269.
5. Borgatti, S.P., Everett, M.G.(2006), “A graph-theoretic perspective on centrality”, Social Networks, 28, pp.466~484.
6. Freeman, L.C.(1979), “Centrality in networks: I. Conceptual clarification”, Social Networks, 1, pp.215~239.
7. Newman, M. E. J.(2004), “Analysis of weighted networks”, Physical Review E, 70, 056131.
8. Newman, M. E. J.(2007), “The mathematics of networks”, In The New Palgrave Encyclopedia of Economics, 2nd edition. Palgrave Macmillan, Basingstoke.
9. TCRP Report 100(2003), “Transit Capacity and Quality of Service Manual-2nd Edition”, Transportation Research Board. National Academy Press, Washington, D.C.
10. Wuchty, S., Stadler, P.F.(2003), “Centers of complex networks”, Journal of Theoretical Biology, 223, pp.45~53.
11. Yang, S., Knoke, D.(2001), “Optimal connections: strength and distance in valued graphs”, Social Networks, 23, pp.285~295.

✉ 주 작성자 : 박준식

✉ 교신저자 : 강성철

✉ 논문투고일 : 2009. 12. 28

✉ 논문심사일 : 2010. 2. 28 (1차)

2009. 4. 6 (2차)

2010. 4. 14 (3차)

✉ 심사판정일 : 2010. 4. 14

✉ 반론접수기한 : 2010. 10. 31

✉ 3인 익명 심사필

✉ 1인 abstract 교정필