

서울 대도시권 지하철망의 구조적 특성 분석*

박종수** · 이금숙***

요약: 본 연구의 목적은 최근 다양한 네트워크 분석에 활발히 적용되고 있는 복잡성 분석을 통하여 수도권 지하철 망의 구조적 특성을 연구하는 것이다. 이를 위하여 수도권 지하철 망을 점과 선으로 구성되는 네트워크로 구성하고, 네트워크의 복잡성 분석에서 계산하는 다양한 지표들을 산출하여 그에 대한 해석을 시도하였다. 특히 본 연구에서는 교통카드를 이용해 움직이는 수도권 대중교통이용자의 통행기록을 담고 있는 대용량 교통카드 트랜잭션 데이터베이스로부터 수도권 지하철망의 구조적 특성을 찾아내기 위한 알고리즘을 개발하고 그의 적용으로 얻어진 결과를 분석하였다. 또한 지하철역과 역 사이의 시간거리와 실제거리에 대해 최단경로를 탐사하는 알고리즘을 개발하고, 이를 통하여 얻어진 최단경로거리와 최단거리의 분포 구조를 분석하였다. 특히 최단 경로거리와 최단 거리의 합을 산출하여 수도권 지하철망을 통하여 각 역에서 다른 모든 역들에 도달하기 용이한 정도를 의미하는 접근성 지표로 삼고, 이를 GIS를 사용하여 수도권의 접근성의 공간적 분포를 나타내고 그의 공간적 구조를 분석하였다.

주요어: 복잡성 분석, 네트워크 구조, 최단경로 탐색, 접근성 측정, 접근성 공간구조, GIS

1. 서론

지표 공간에서 지역 간의 이동은 교통망을 따라 나타나므로 주어진 교통망의 구조는 지역 간의 통행흐름과 토지이용을 결정하는 골조를 이룬다 (Wilson, A. G., 1998; 이금숙, 1995). 특히 대부분의 사람들이 가능하면 가장 경제적인 경로를 택하려는 속성을 지니고 있으므로 교통망의 연결구조와 지점 간 최단 경로(최소 거리, 최소 비용, 혹은 최단 시간)를 찾는 문제는 통행 분석이나 지역 공간구조 분석에서 핵심적인 부분이다(Miller, H. J., 1999; Bruinsma, F. &

Rietveld, P., 1998; Kwan, M. P., 1998; Handy, S. L. & Niemeier, D. A., 1997; Gutierrez, J. & Urbano, P., 1996; Guy, C. M., 1983; Pirie, G. H., 1981; Koenig, J. G., 1980; Black, J. & Conroy, M., 1977; Dalvi, M. Q. & Martín, K. M., 1976; Vickerman, R. W., 1974; Wachs, M. & Kumagai, T. G., 1973; Ingram, D. R., 1971; Hansen, W. G., 1959).

최근 컴퓨터와 인터넷의 발전으로 대용량의 정보를 수집하고 저장하며 처리할 수 있게 되어 수천, 수만 개 이상의 노드를 가진 거대한 연결망과 이들 노드 간의 상호작용에 대한 연구가 가능해지면서 복잡

* 이 논문은 2007년도 성신여자대학교 학술연구조성비 지원에 의하여 연구되었음.

** 성신여자대학교 컴퓨터정보학부 교수

*** 성신여자대학교 지리학과 교수

한 연결망 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히, 그동안 수많은 입자로 이루어진 물질과 복잡계 시스템을 연구해오던 통계물리학의 이론이 이러한 연결망 연구에 적용되어 연결망의 특징을 나타낼 수 있는 많은 지수들이 소개되면서(Huang, 1987; Watts & Strogatz, 1998; Barabasi & Albert, 1999; Albert & Barabasi, 2002) 실제 존재하는 다양한 연결망들에 복잡계 연결망 이론을 접목시키려는 노력이 이루어지고 있다. 교통망 역시 이러한 연결망의 분석 대상으로 전 세계 항공망 구조가 척도 없는 복잡계 연결망과 같은 구조를 갖는 것이 밝혀지면서(Amaral et al., 2000) 최근 미국과 영국, 그리고 중국 등에서 다양한 교통망에 대한 분석이 활발히 진행되고 있다(Latora & Marchiori, 2002; Seaton & Hackett, 2004; Li & Cai, 2004; Zhao, et al., 2005; Sienkiewicz & Holyst, 2005; LI, 2007;).

우리나라 수도권 지하철망은 2천만 수도권 인구 통행의 1/3 이상을 분담하는 주요교통망으로 수도권 지하철망의 구조분석은 수도권 인구의 통행흐름의 공간구조는 물론 수도권 지역 토지이용 구조를 이해하기 위해 매우 중요하다. 특히 서울(광역)시에서는 대중교통 이용자의 90% 이상이 교통카드를 사용하고 있어 적어도 대중교통 이용자에 대한 통행 자료는 거의 전수에 가까운 통행 자료가 생성되어 교통카드 데이터베이스에 축적되고 있다. 개개인의 통행궤적에 대한 시·공간적 정보를 담은 교통카드 거래내역 데이터베이스를 효과적으로 활용하면 도시 교통흐름에 대한 유용한 자료를 생성할 수 있다. 정보화가 확대되면서 컴퓨터정보과학 분야에서 활발히 연구되고 있는 데이터마이닝기법을 이용하면 도시통행자에 대한 막대한 통행정보를 담고 있는 대용량의 교통카드 트랜잭션데이터베이스에서 통행에 대한 여러 가지 필요한 정보를 효과적으로 추출해 낼 수 있게 되었다(Lee & Park, 2005). 그의 일환으로 앞서 수도권 대중교통이용자의 통행기록을 담고 있는 대용량 교통카드 트랜잭션 데이터베이스로부터 데이터마이닝 기법을 이용하여 교통카드를 이용해 움직이는 수도권

대중교통이용자들의 통행 패턴과 통행흐름에 대한 분석이 시도되었다(이금숙·박종수, 2005, 2006, 박종수·이금숙 2007, 이금숙 외 2007).

본 연구에서는 대용량 교통카드 트랜잭션 데이터베이스로부터 데이터마이닝 기법을 이용하여 수도권 지역 통행에서 가장 중심적인 역할을 하는 수도권 지하철망의 구조를 분석하고자 한다. 이를 위하여 복잡계 시스템의 연결망 연구에서 연결망의 특징을 밝히기 위해 적용되어 온 다양한 지수들을 구하는 알고리즘을 개발하고 그의 적용으로 얻어진 결과에 대한 분석을 시도하였다. 특히 기존의 복잡계 연결망 연구들과는 달리 본 연구에서는 연결망의 위상학적 경로거리 뿐만 아니라 교통망상의 교통로의 물리적 거리와 시간 거리 등 실제거리를 감안한 최단경로를 바탕으로 한 분석을 시도하였다. 또한 수도권 지하철망의 구조적 특성과 실제 통행흐름과의 관계성을 파악하기 위하여 교통카드를 이용해 움직이는 수도권 대중교통이용자의 통행기록을 담고 있는 대용량 교통카드 트랜잭션 데이터베이스로부터 통행흐름을 탐사한 결과를 GIS를 이용하여 공간적 구조를 비교분석하고자 한다.

2. 수도권 지하철망의 구조분석을 위한 데이터마이닝 과정

서울을 중심으로 하는 수도권에서는 교통카드이용이 일반화되어 대중교통 이용자의 대부분이 교통카드를 이용하고 있어 서울 대중교통체계 상의 데이터 흐름(data stream)에 해당하는 교통카드의 거래 내역에 관한 대용량의 데이터가 데이터베이스에 계속해서 저장되고 있는 상황이다. 현재 수도권 지역의 대중교통 이용자들이 움직이면서 생성하고 있는 교통카드데이터는 개개 통행자가 실제로 움직이는 궤적을 담은 통행 자료로서 그 안에 있는 막대한 통행에 대한 정보 자료가 담겨있으며(이금숙·박종수,

2005), 하루에도 약 2,000만 건에 달하는 교통 카드의 기록으로 구성된 트랜잭션 데이터베이스가 매일 생성되고 있다.¹⁾ 특히 교통카드 이용 승객의 요금은 버스과 지하철을 단일 요금 체계에서 하나의 거래단위(transaction unit)로 계산되므로 교통 카드를 사용한 승객의 탑승 출발지에서 하차 도착지까지의 환승 기록이 컴퓨터에서 데이터베이스로 관리된다. 한 명의 승객에 대한 거래단위(transaction unit)는 그 승객이 버스에서 하차하여 30분 이내에 다른 버스나 지하철을 환승하고 4번의 버스 환승 승차까지 허용된다. 그러므로 한 승객은 한 번의 요금 지불로 5번의 버스를 갈아타서 원하는 목적지에 도착할 수 있다. 이런 요금 체계를 관리하기 위하여 모든 승객들의 이동 경로(travel route)에 대한 데이터베이스가 구축되어 운영되고 있다.

정보 기술이 발달하면서 정보획득의 용이성이 향상됨은 물론 다양한 부문에서 생성되는 정보자료의 양이 엄청나게 방대해 지게 되었다. 따라서 정보처리 부문에서는 이러한 방대한 자료를 효과적으로 처리하여 필요한 형태의 정보로 정리해 낼 수 있는 데이터 마이닝의 중요성을 인식하고 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 최근에는 Agrawal & Srikant (1995)에 의해 소개된 데이터베이스에서 요구하는 지식 발견(KDD; Knowledge Discovery in Databases)을 효과적으로 발굴해 내는 순회 패턴 탐사(mining traversal patterns)에 대한 연구가 주목을 받고 있다 (Han & Kamber 2006; Tan, et al., 2006).

교통 카드에 의한 승객의 transaction unit에 저장되어 있는 정보는 카드번호 SEQ, 승차일시, Transaction ID, 교통수단코드(버스 또는 지하철), 환승횟수, 버스노선 ID, 버스노선명, 교통사업자 ID를 포함한 24개의 속성들(attributes)을 포함하고 있다(박종수 · 이금숙, 2006). 승객에 관한 데이터는 하루 약 10GB의 크기인데, 이를 정제하면 약 5GB의 데이터 크기로 저장할 수 있다. 한 달에 약 300GB의 크기가 되고, 일 년이 지나면 3TB의 대용량의 데이터베이스에 이르게 된다. 이런 대용량 데이터베이스에서 숨겨

져 있는 정보나 지식에 해당되는 여러 패턴이나 연관성을 찾아내는 것은 컴퓨터정보학에서 중요한 연구 토픽들 중의 한 분야이다. 특히 이를 지리정보체계의 데이터베이스와 결합하여 효과적으로 분석하면 수도권권역에서 지역 간의 실질적인 기능적 연계 및 도시의 공간구조를 분석 할 수 있고, 그 결과는 토지이용 계획 및 시설계획 등 다양한 교통정책 수립에 귀중한 기초 자료를 제공할 수 있으므로 교통카드 데이터를 기반으로 수도권 지역 대중교통 이용자의 통행패턴 분석은 컴퓨터정보과학 분야에서도 관심이 높은 부분이다.

본 연구의 목적은 수도권 지하철망의 구조적 특성을 분석하는 것이므로 본 연구에서는 Agrawal & Srikant (1995)에 의해 소개된 후 후속 연구가 활발히 진행되고 있는 데이터베이스에서 요구하는 지식 발견(KDD; Knowledge Discovery in Databases)를 효과적으로 발굴해 내는 순회 패턴 탐사(Mining Traversal Patterns) 법을 원용하여 (Park, et al. 1997; Chen, et al. 1998; Han & Kamber 2006; Tan, et al., 2006) 개발된 수도권 교통카드 트랜잭션 데이터베이스에서의 통행패턴 탐사알고리즘(박종수 · 이금숙, 2007)을 좀 더 정교하게 체계화하여 다양한 교통망 구조분석을 위한 지표를 생성할 수 있도록 적절한 데이터마이닝 알고리즘을 개발하고자 한다. 다음은 본 연구에서 수도권 대중교통 체계에서 승객들의 교통 카드 거래에 대한 정보를 저장하는 대용량의 데이터베이스에서 수도권 지하철망에 대해 네트워크를 그래프(graph)로 표현하고 이를 분석하기 위한 데이터 처리과정을 정리한 것이다.

- 1단계: 대중교통 이용자들의 하루치 전체 교통카드 거래 데이터²⁾ 중에서 먼저 지하철에 해당되는 정보만을 추출해 내기 위하여 “교통수단CD”에서 200을 가진 트랜잭션만 선별하는 과정을 거쳐야 한다.
- 2단계: 지하철 연결망의 구조분석을 하기 위해서는 우선 지하철 망을 점과 선으로 구성한 하나의 그래프로 구성하여야 한다. 그래프의 정점(vertex 또는

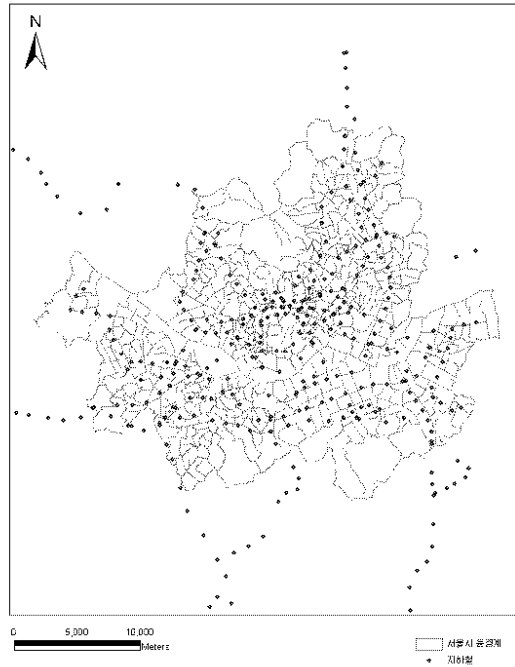


그림 1. GIS를 적용한 수도권 지하철역의 위치도

node)은 지하철역을 나타내고, 간선(edge 또는 link)은 지하철 노선에서 지하철역 간의 연결된 선로를 나타낸다. 교통카드 거래 자료에는 지하철 환승역들의 경우 노선마다 각기 별도의 역으로 간주하고 되고 있으므로 환승역들의 ID를 찾아내어 통합하는 과정을 거친다.³⁾

- 3 단계: 본 연구에서는 실제 교통로를 따라 소요되는 물리적 거리를 사용하여 분석하기 위하여 단순한 위상학적 그래프보다는 GIS를 이용하여 데이터 베이스를 구축한다. 다음 <그림 1>은 2007년 현재 수도권 지하철망을 구성하고 있는 10개의 지하철 노선의 380개 지하철역에 대한 지리좌표인 위도와 경도를 입력데이터로 하여 GIS로 표현한 것이다.
- 4 단계: 수도권 지하철망을 하나의 graph로 구성하고, 그래프의 정점과 간선의 표현은 인접행렬(adjacency matrix) 방식으로 나타낸다. 1) 먼저 교통카드의 지하철 노선과 지하철역 등의 데이터로

기본적인 인접행렬을 구성하고, 인접행렬의 각 셀의 값은 연결 여부를 나타내는 0/1로만 표시한다.

- 5 단계: 위치정보를 바탕으로 인접행렬의 역 간 실제 거리와 시간거리를 산출하여 인접행렬의 각 셀 값에 입력하여 실제거리와 시간거리로 가중치가 주어진 그래프를 구성한다.
- 6 단계: 이 단계에서는 수도권 지하철망 상의 임의의 한 정류장에서 다른 정류장까지 가는 최단 경로(shortest path)를 구하는 알고리즘을 개발하고, 이를 이용하여 지점 간 최단경로를 탐색한다. 이를 위하여 burning algorithm을 사용한다. 특히 GIS를 통하여 얻어지는 실제 교통로 거리와 시간거리 등을 산출한다. 인접 행렬을 입력으로 하여 최단 경로 알고리즘(shortest path algorithm)을 적용하면 (Neapolitan & Naimipour, 1997), 한 지하철역에서 다른 지하철역까지의 경로에서 통과한 지하철역들의 이름과 그 개수를 알 수 있다. 그리고, 길이

인접 행렬을 입력으로 최단 경로 알고리즘을 적용하면, 한 지하철역에서 연결된 다른 지하철역까지 최단 경로의 실제 거리를 계산할 수 있다.

- 7 단계: 이상의 과정으로 얻어진 연결망 그래프를 바탕으로 연결망의 구조 분석을 위한 다양한 지표 값을 산출한다.
- 8 단계: 마지막으로 수도권 지하철망을 이용하여 통행하는 통행흐름과의 관계를 분석하기 위하여 본 연구에서는 하루치의 교통카드 사용자들의 트랜잭션 데이터를 분석하였다.

이러한 분석을 위해 본 연구에 사용되는 컴퓨터 시스템은 Intel Core 2 Duo 콘로E6600 CPU, 2GB Main Memory, Visual Studio 6.0, Windows XP Professional OS의 PC와 인텔 Xeon IrwinDale 3.0 Two CPUs, 8GB main memory, 맥스터 Atlas 15K II 36GB HDD, C++ programming language, RHEL Linux OS이다.

3. 수도권 지하철 연결망의 구조적 특성

연결망 이론은 이미 그래프 이론(graph theory) (Biggs, et al., 1986; Erdos & Renyi, 1960)이라는 이름으로 수학분야에서 오랫동안 연구되어 왔을 뿐 아니라 사회과학분야에서도 사회 연결망(social network) 이론 (김용학, 2003a, 2003b; Freeman, 2004)을 중심으로 많은 연구가 이루어졌다. 정점들(nodes)과 연결선들(links)로 구성된 연결망에서 대개 정점은 연결망을 이루는 구성요소(agent)를, 연결은 구성요소 간의 상호작용(interaction)을 의미한다. 그런데 이런 최근의 연결망 연구에 그동안 수많은 입자로 이루어진 물질과 시스템을 연구해오던 통계물리학의 이론 (Huang, 1987; Barabasi, 2002)을 적용하여 복잡계 연결망에 대한 분석이 다양하게 진행되고 있다.

연결망 그래프 G 의 특성을 측정하기 위해 우선 그래프의 정점을 연결하는 연결수와 그래프의 지름, 대표적 경로 수 등과 함께, 각 정점에 붙어 있는 연결선의 개수인 연결수의 분포(degree distribution)와 결속 계수(clustering coefficient), 집중화도(centrality), 통과도(betweenness) 등이 산출된다 (Newman, 2003; Albert & Barabasi, 2002): i) 그래프 G 에서의 지름(diameter)은 $D(G) = \max_{u \in V} \max_{v \in V} d(u, v)$ 로 정의되고, 반면에 반지름(radius) $R(G) = \min_{u \in V} \max_{v \in V} d(u, v)$ 로 정의 한다 (Parongama, et al., 2003). $d(u, v)$ 는 정점 u 에서 정점 v 까지의 최단 거리이다. 지름(diameter)은 임의 한 쌍의 정점들 사이의 최대 거리이며, ii) 그래프의 정점 간 대표적 최단 거리 L 는 $L = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} d_{ij}$ 로 나타내며, 그래프 정점 간 최단거리의 총합의 평균(the average distance between two generic vertices)을 나타내는 것으로 다음 식으로 구한다.

$$d_{mean} = \frac{1}{\frac{1}{2} n(n+1)} \sum_{i \neq j} d_{ij}$$

여기서 d_{ij} 는 정점 i 와 정점 j 사이의 측지 거리 혹은 그래프거리 (geodesic distance or graph distance)를 나타낸다. 정점들 사이의 최단거리를 구하기 위해 본 연구에서는 burning algorithm (Herrmann, et al., 1984)를 사용하였다. iii) 결집계수(clustering coefficient) C 는 연결된 세 정점들 사이의 평균 분수(average fraction)로 다음 식으로 구한다.

$$L = \frac{3 \times \text{number of triangles in the network}}{\text{number of connected triples of vertices}}$$

iv) 정점이 k 개의 다른 노드들과 연결되어 있는 정도는 $D(k)$ 로 나타낸다. 즉, 그래프 G 의 중요한 수량은 정점(vertex) i 의 차수(degree)로서 정점 i 에 인접한 간선(edge)들의 개수 k_i (i 의 이웃들의 개수)이다. k_i 의 평균값은 $k = 2K/N$ 이다. $\{a_{ij}\}$ 가 주어지면 두 정점 i 와 j 사이의 최단경로길이(shortest path length) d_{ij} 의 행렬(matrix)을 계산해낼 수 있다. 여기서 G 가 연결되

었다고 한다면 $i \neq j$ 인 정점들에 대하여 d_{ij} 는 양수이고 유한하다는 것을 의미한다. 결집계수를 통하여 연결망의 정점들이 얼마나 조밀하게 결합되어 있는지를 살펴볼 수 있다. v) 집중화도는 임의의 정점에서 그래프의 다른 모든 정점에 도달하기 위한 경로수로 접근성의 정도를 나타낸다 (Lee & Lee, 1998). vi) 한편 통과도는 연결망에서 임의의 정점이 가지는 연결의 중요성을 나타내는 것으로, 만약 통과도가 높은 정점이 연결망에서 이탈하거나 문제가 생겨 제 역할을 하지 못할 경우, 연결망 전체 흐름에 막대한 지장을 주게 될 것이다.

본 연구의 대상인 수도권 지하철망의 연결망 그래프는 총 정점수는 380개, 총 연결선수는 424로 구성되어 있으며⁴⁾, 위상학적인 그래프의 지름 D는 62개이며, 대표적 최단거리 L은 19.96개로 나타나고 있다. 한 지하철 역과 다른 지하철역들 사이의 연결 정도를 나타내는 것은 차수(degree)로 표시하며, 수도권 지하철망의 경우 하나의 정점에 2개의 연결선이 붙여 있는 경우가 가장 많으며, 그 다음으로 4개의 연

결선이 연결된 경우이며, 최대 차수는 6으로 이에 해당되는 지하철역은 종로3가와 왕십리 역이고, 그리고 차수가 5가 되는 역은 동대문운동장과 신도림역이다. <그림 2>는 수도권 지하철 연결망 그래프 G의 차수확률분포를 나타낸 것이다.

실제 존재하는 연결망 자료를 조사해 보면 연결수의 분포가 정규분포를 보이지 않고, 거듭제곱 분포(power-law distribution)를 보이는 경우가 많다 (Albert et al., 1999.). 이는 연결망에서 굉장히 많은 연결을 맺고 있는 허브(hub)의 역할을 하는 정점이 존재하기 때문이다. 수도권 지하철 연결망의 경우 하나의 연결선이 연결된 경우도 비교적 많은 것으로 나타나고 있는데 이처럼 하나의 연결선만 연결된 정점들이 있는 경우에 $C_i = \frac{0}{0}$ 이기 때문에 C는 잘 정의되지 않는다 (Latora & Marchiori, 2002). 따라서 본 연구에서는 차수(degree)가 1인 정점들인 지하철역의 경우를 제외한 경우의 결집계수(clustering coefficient)를 다음 식과 같이 계산하여 6.41×10^{-3} 을

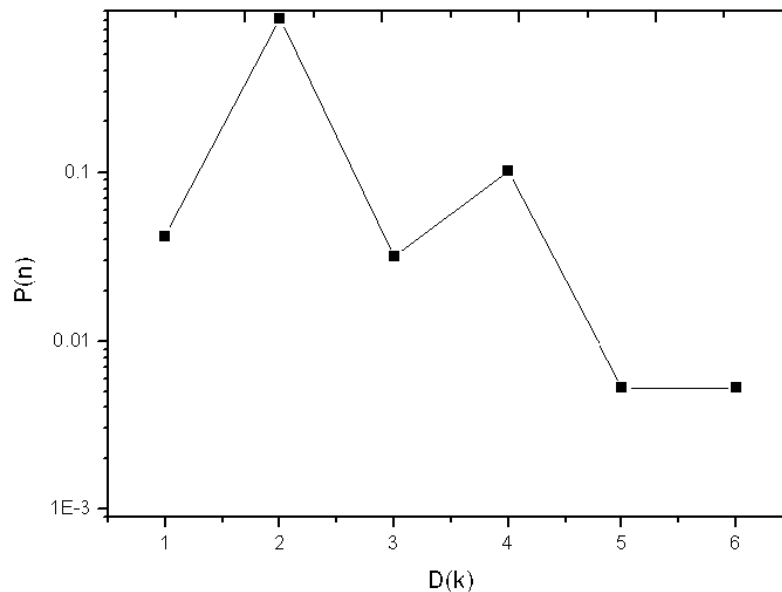


그림 2. 수도권 지하철망의 차수 확률분포

얻었다.

$$C = \frac{1}{N - |\{v_i | k_i = 1\}|} \sum_{i \neq \{1, k_i - 1\}} C_i$$

기존의 연결망 분석들이 네트워크의 위상학적 구조에 초점을 두어 정점들 사이에 연결여부만을 바탕으로 네트워크를 구축하였으나, 본 연구에서는 도시 통행에 직접적인 영향을 미치는 교통로의 실제거리(혹은 시간거리)를 바탕으로 수도권 지하철 망을 분석하기 위해 각 지하철역의 위치좌표인 위도와 경도를 입력하고, 모든 지하철 노선에 대하여 지하철역 사이의 연결 정보를 간선으로 입력하여 가중치가 주어진 네트워크를 구축하였다. 위치좌표 지하철 연결망 그래프에 대해 두 지하철역 사이의 연결을 나타내는 인접 행렬(adjacency matrix)과 연결된 두 지하철역 사이의 실제 거리를 나타내는 실제거리 인접 행렬(length-adjacency matrix)을 작성하였다. 위치 좌표를 이용하여 지하철역들 사이에 실제 교통로 길이를 바탕으로 최단거리를 구한 결과 최단거리의 최소값은 238.73 meter <청량리(지상) - 청량리(지하)>이고,

최대값은 139.069km (천안 - 소요산) 인 것으로 나타나고 있다.⁵⁾ 다음 <그림 3>은 수도권 지하철망의 연결그래프상의 정점 간 최단거리의 빈도 분포를 나타낸 것이다. 여기서 위상학적 거리로 최단경로를 구한 경우의 경로수의 분포와 실제거리로 최단경로거리를 구한 경우의 경로 분포의 경우 차이를 보이는데 이는 역간의 실제 물리적인 거리가 일정하지 않기 때문에 나타나는 현상이다. 위상학적 거리를 바탕으로 한 경우 최빈값은 두 역 사이의 간선(edge)의 개수가 14일 때이고, 그러한 경로들(shortest paths)의 개수는 2,737 이며, 대표적인 최단경로거리는 19.96개이다. 그러나 실제거리를 바탕으로 하여 최단 경로거리를 산출한 경우 최빈값은 두 역 사이의 거리가 16km(실제는 15 <= dist < 16)인 경로인 경우이고, 그러한 경로들의 개수는 2,073 이며, 대표적 최단경로 거리는 27.91km이다. 이는 인접한 정점 간 실제 물리적 거리가 1km보다 커서 나타나는 현상으로 여겨진다.

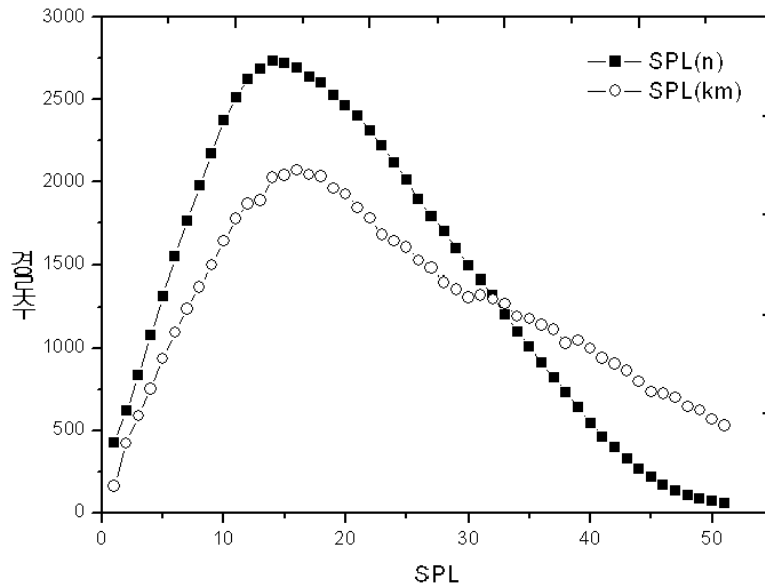


그림3. 수도권 지하철망의 최단거리 빈도분포

4. 수도권 지하철망 접근성 구조와 지하철 이용자의 통행량 분포

1) 수도권 지하철망의 접근성 구조

수도권 지하철망은 1974년 1호선의 일부 구간이 건설되어 운영을 시작하여 현재까지 몇 차례의 확장 과정을 거쳐 오면서 수도권 지역의 중추적인 교통수단의 역할을 하고 있다. 따라서 수도권 지하철망으로 주어지는 접근성은 수도권 지역 통행흐름과 토지이용패턴 형성에 막대한 영향을 미치고 있다. 특히 1984년 지하철1호선부터 4호선까지 완성된 1기 지하철망과 1998년 5호선에서 8호선까지 제2기 지하철망이 완성되는 등 몇 차례의 확장과정을 거쳐 오면서 수도권 지하철망에 의한 접근성 구조의 변화와 함께 수도권에서는 통행흐름과 토지이용패턴에도 많은 변화를 보여 왔다 (Lee, K. & Lee, H., 1998; 이금숙, 1995; 이금숙·김경숙, 1994). 그런데 제2기 수도권 지하철망이 확충된 이후 10년 가까이 시간이 경과하면서 최근 인천지하철망이 확충되고, 천안과 인천 국제공항 등 수도권 외곽지역까지 노선이 확장되었으므로 이로 인한 수도권 지하철망 상 접근성의 공간적 구조의 변화가 다시 수도권지역의 통행흐름과 토지이용에도 영향을 미칠 것으로 예상된다. 따라서 본 장에서는 현재 수도권 지하철망의 접근성구조를 분석하고, 이를 실제 수도권 지하철 이용자의 통행흐름과 비교하고자 한다.

교통망의 네트워크 구조는 네트워크를 구성하고 있는 정점들 간 연결의 효율성 및 용이성과 관련 된 것으로 그를 통한 통행흐름에 영향을 미친다 ((Newman, 2003; Albert & Barabasi, 2002). 특히 교통망 상의 정점들이 주어진 교통망을 통해 다른 모든 정점에 접근하기 용이한 정도를 의미하는 집중화도 (centrality)나 통과도(betweenness) 등은 연결망에서 주어진 교통망 상 정점들이 획득하게 되는 접근성의 개념으로 정의될 수 있다 (Lee & Lee, 1998). 교통망

을 통하여 다른 지점들로부터 또는 다른 지점으로 도달하기 용이한 정도를 나타내는 접근성은 통행수요의 가능자가 될 수 있으며, 한 장소가 주변지역에 대해 지니게 되는 입지의 상대적 우위성을 나타내는 것으로 자가형성의 기본요소이며 (이금숙 & 김경숙, 1994), 결과적으로 도시적 시설물 입지결정의 핵심요인으로 작용하게 된다 (Lee, K. & Lee, H., 1998). 따라서 교통망의 접근성의 구조와 통행흐름의 관계분석은 교통연구는 물론 다양한 도시시설 입지연구 및 공간경제 연구에 매우 유용한 정보를 제공할 수 있다. 본 장에서는 특히 수도권 지하철망의 접근성 구조와 지하철 이용자의 통행흐름을 공간적 측면에서 비교분석해 보고자 한다. 이를 위하여 수도권지하철망 상 각 정점에 대해 접근성을 산출하고, 실제로 이를 이용하여 통행하고 있는 대중교통 이용자들의 통행기록을 담은 교통카드 트랜잭션 데이터베이스에서 탐사된 통행패턴과 비교하고자 한다.

본 연구에서는 2008년 현재 수도권 지하철망의 접근성 구조를 파악하기 위하여 앞에서 구한 정점 간 최단거리를 바탕으로 접근성을 산출하는 알고리즘을 개발하여 적용하였다. 연결망 그래프에서 각 정점에서 다른 모든 정점들 간의 최단거리를 모두 합산한 값을 각 정점의 접근성 값으로 정의할 수 있다 (O'Kelly, et al., 1996). 하지만 이렇게 구한 최단경로 거리 접근성 지표의 경우 접근성이 높은 정점일수록 최단거리 총합이 적게 나타나므로 본 연구에서는 접근성이 높은 정점이 높은 값을 나타내도록 하기 위하여 다음 식을 적용하였다.

$$A_i = B \frac{1}{\sum_{j(\neq i)} r_{ij}}$$

즉, 정점 i 의 접근성 A_i 는 최단거리 총합의 역수에 계수 B 로 조절한 값이다. 여기서 r_{ij} 는 정점 i 와 j 사이의 최단거리로 그래프거리의 경우 최단경로 수 n_{ij} 를 적용하고, 물리적 실제거리의 경우 두 지점 간 교통로의 실제거리 d_{ij} 를 적용한다. 다음 <표 1>은 위의 식을 적용하여 얻어진 현재 수도권 지하철망의 접근

표 1. 수도권 지하철망의 접근성

순위	2기 지하철망 연결도	최단경로 수 n_{ij} 로 산출한 접근성	물리적 실제거리 d_{ij} 로 산출한 접근성
1	종로3가역	이촌	동대문운동장
2	을지로3가	용산	을지로3가
3	충무로	옥수	종로3가
4	을지로4가	서빙고	을지로4가
5	신당역	동작	시청
6	청구역	한남	을지로입구
7	동대문역	노량진	종각
8	동묘앞역	응봉	청구
9	약수역	왕십리	신당
10	시청역	총신대입구	종로5가
11	동대문운동장	신용산	동대문
12	신설동역	남영	약수
13	서울역	대방	동묘앞
14	충정로역	압구정	옥수
15	남영역	신길	이촌
16	종로5가역	금호	삼각지
17	왕십리역	서울역	왕십리
18	삼각지역	내방	버티고개
19	용산역	사당	충정로
20	청량리역	고속터미널	공덕
21	종각역	상왕십리	상왕십리
22	을지로입구	시청	서울역
23	이촌역	충무로	신금호
24	강남구청역	삼각지	용산
25	동대입구역	회현	한강진
26	상왕십리역	신사	애오개
27	안국역	동대문운동장	금호
28	옥수역	영등포	광화문
29	숙대입구역	청량리(지상)	이태원
30	명동역	잠원	한남

성 구조와 1998년 당시 수도권 2기 지하철망의 접근성 구조와 비교하기 위하여 각각의 경우 접근성 값의 상위 30위까지의 지하철역을 순위별로 정리한 것이다.

1998년 2기 지하철망 이후 새로운 노선들이 추가 되고 일부 노선이 확장되면서 수도권 지하철망의 접근성 구조에 상당한 변화가 있음을 보여주고 있다. 특히 경로거리를 바탕으로 접근성을 측정한 경우 접근성이 가장 높은 지역이 한강 주변의 지하철역들로 나타나며, 그를 중심으로 강북의 도심지역으로 연결

되고, 점차 외곽으로 가면서 낮아지는 구조를 보인다. 그러나 실제 물리적 거리를 적용하여 접근성을 측정한 경우를 보면 일부 역의 순위가 바뀌기는 했지만 여전히 강북의 도심지역 주변의 지하철역들이 접근성이 가장 높게 나타나는 지역이며, 이로부터 외곽으로 가면서 차츰 낮아진다. 다음 <그림 4>는 1998년 2기 지하철망과⁶⁾ 그 후 보강된 2008년 수도권 지하철망에 있는 역들의 접근성 값의 순위 분포를 나타낸 것이다.

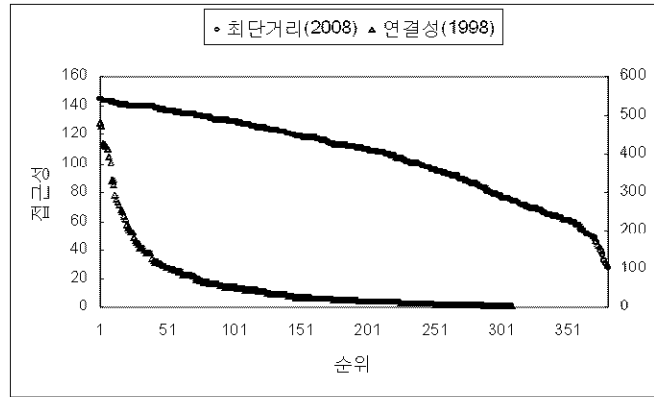
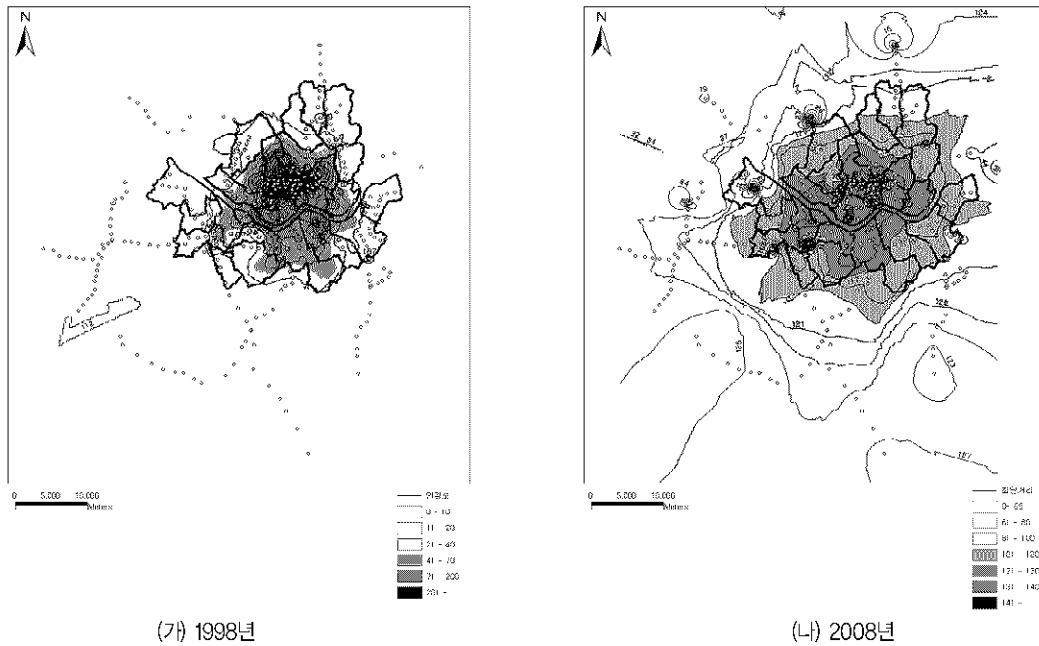


그림 4. 수도권 지하철망의 접근성 순위 분포

1998년 2기 지하철망의 경우 접근성이 높은 상위 역들과 50위 이하의 역들 사이에 접근성 값에 현격한 차이를 보였으나 2008년의 경우 전체적으로 접근성이 높아져 그 격차가 크게 줄어든 양상을 보인다. 이는 GIS를 이용하여 두 시점의 수도권 지하철망 접근

성의 공간적 분포를 나타낸 <그림 5>에서 확연히 드러나고 있다. <그림 5>의 (가)에 표현된 1998년 2기 지하철망의 접근성 값의 분포는 지하철 노선이 지나가는 선로 축을 따라 다소 확장되기는 하지만 전반적으로 강북 도심지를 중심으로 하는 지역이 가장 높은



(가) 1998년

(나) 2008년

그림 5. 수도권 지하철망 접근성의 공간적 분포 구조

접근성 값을 보이고 그로부터 외곽으로 나가면서 현격히 접근성 값이 낮아진다. 이에 반하여 현재 수도권 지하철망의 접근성은 도심에 중심을 가지고 있기는 하지만 외곽으로 상당한 거리까지도 비교적 높은 값을 보이며 좀 더 도심원에 유사한 분포 구조를 보인다. 물론 1998년의 경우 연결성(connectivity)을 바탕으로 접근성을 측정하였고, 2008년은 최단거리를 바탕으로 측정한 차이가 있어 직접적인 수치의 비교는 의미가 없지만 지하철망이 계속 확충되면서 전체적으로 수도권 지하철망에서 지하철역들의 접근성 값이 높아지고 격차가 크게 줄어들었음을 알 수 있다.

2) 수도권 지하철 이용자의 통행량 분포

지하철을 이용한 사람들의 실제 통행기록을 담고 있는 교통카드 트랜잭션 데이터에서 각 지하철역별 출발통행량과 도착통행량을 탐사하기 위하여 2007년 5월 16일 하루치 교통카드 거래 자료를 이용하였다. 이 자료로부터 각 지하철역의 통행량을 탐사하기 위하여 지하철을 이용한 트랜잭션에서 “승차정류장 ID”, “하차정류장ID”, “승차일시”, “하차일시”를 분리해내어 O/D 행렬의 승차 역의 인덱스와 하차 역의 인덱스를 결정하고, 그 다음으로 출발 시간대와 하차 시간대에 따라 승객 수를 증가시키고 이동 시간을 계

산하는 데이터마이닝 알고리즘(박종수·이금숙, 2007)이 적용되었다. 이날 하루 총 10,856,338 트랜잭션들 중에서 지하철을 사용한 승객들의 트랜잭션은 5,160,510건이 탐사되었다. 다음 <그림 6>의 (가)와 (나)는 각각 경로거리와 시간거리별 통행자의 빈도분포를 보인 것이다.

수도권지역에서 지하철을 이용하여 통행하는 사람들의 통행거리는 경로거리의 경우 최빈값 7을 전후하여 통행자수가 집중되어 있으나 그 뒤로 긴 꼬리를 가지고 있어 전체 평균은 13.62개로 나타나고 있으며, 경로거리 30이내에 전체 통행의 95% 정도가 분포하고 있다. 시간거리의 경우 수도권 전체 통행의 90% 이상이 10분대에 가장 많은 통행빈도를 보이며 30분 이내의 통행이 전체 통행의 60% 정도를 차지하고, 시간거리 60분 이내에 전체 통행의 90% 이상이 분포하고 있다. 또한 수도권 지하철망의 지하철역별 통행량의 순위 분포는 최상위 역이 현격히 두드러지는 순위분포와 유사한 양상을 보이며, 특히 50위를 전후하여 그 이후로는 큰 차이가 없이 완만하게 줄어드는 구조를 보인다 <그림 7 참조>. 이는 <그림 4>의 접근성 값의 순위 분포와 비교하여 접근성 값은 그 차이가 크게 줄어들었음에도 불구하고 실제 통행량은 역들 사이에 현격한 차이가 나타나고 있음을 알 수 있다.

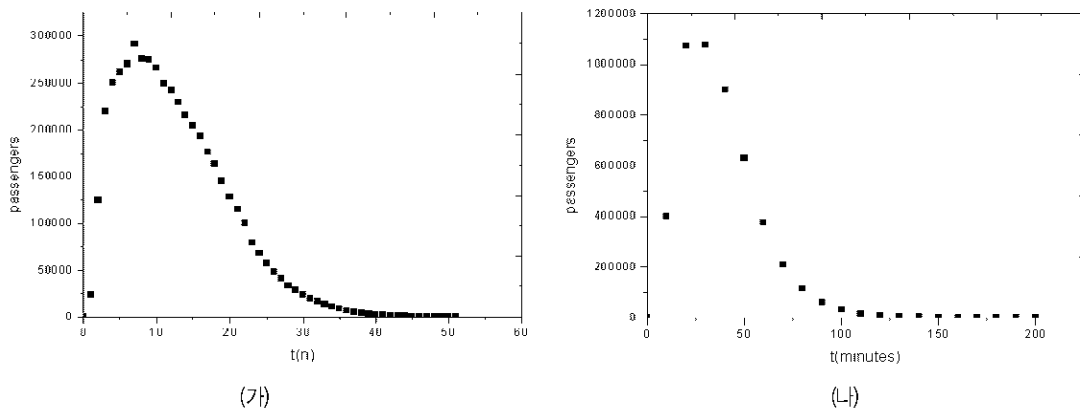


그림 6. 통행거리별 통행 빈도 분포

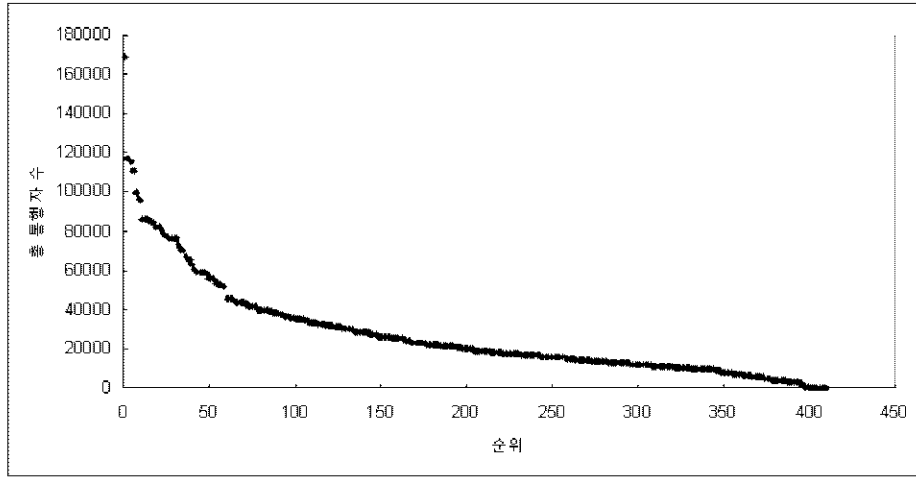
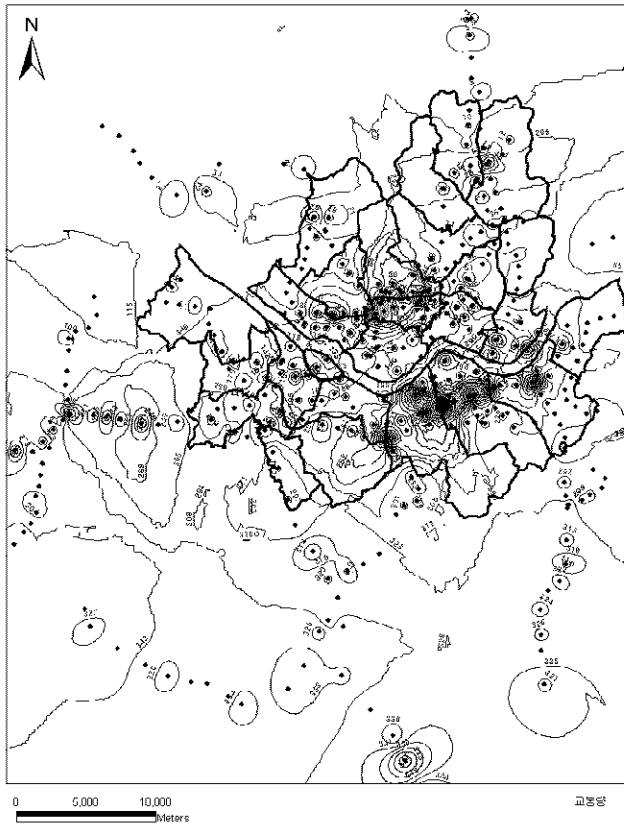


그림 7. 수도권 지하철망 실제 통행량의 순위 분포



순위	통행량
1	강남역
2	선릉역
3	삼정역
4	사당역
5	잠실역
6	교대역
7	역삼역
8	시청역
9	고속터미널
10	을지로입구
11	종로3가역
12	서울역
13	신촌역
14	부천역
15	종각역
16	강변역
17	건대입구역
18	동대문운동
19	부평역
20	송내역
21	홍대입구역
22	충무로역
23	신림역
24	압구정역
25	동대문역

그림 8. 수도권 지하철망 통행량 분포

〈그림 8〉은 실제 지하철 이용자의 통행량 분포를 GIS를 이용하여 지도화한 것이다. 현재 수도권 지하철망의 접근성의 공간 구조를 나타내고 있는 〈그림 5〉의 (나)와 비교하여 실제 지하철 이용자의 통행량 분포는 강남역을 중심으로 그 주변의 지하철 2호선 상에 있는 역들에 가장 많이 집중되고 있으며, 그 다음으로 강북 도심부에 위치한 역들에 집중되고 있다. 또한 대단위 아파트 단지에 가까이 있는 지하철 1호선과 2호선 상의 지하철역들과, 대규모 대학들이 위치한 지점의 2호선 역, 전국적인 기차역이나 고속버스터미널과 연결되어 있는 지하철역, 그리고 대규모 시장과 연결되는 지하철역 등도 많은 통행량을 보여 동심원 구조에 가까운 공간적 구조를 보이는 접근성과는 달리 분산 집중하는 공간적 구조를 나타낸다. 이는 〈그림 8〉의 오른쪽에 열거된 통행량 상위 역들이 앞의 〈표 1〉에 나타난 접근성 값이 높은 역들과 완전히 다르다는 점에서도 뚜렷이 나타난다. 이를 통하여 현재 실제 지하철 통행흐름에는 수도권 지하철망이 제공하는 위상학적 접근성 구조 뿐 만 아니라 그 밖의 요소들이 강하게 작용하고 있음을 알 수 있다. 이는 지하철 연결망을 이루는 정점과 선은 위상학에서 다루는 연결망과 같이 모두 동일한 점과 선이 아니라 그 주변의 토지이용에 따라 인구규모와 통행유발 수요를 각기 달리하며, 또한 그들을 연결하는 교통로의 길이, 통행시간, 배차간격 등에 차이가 있어 단순히 그래프적인 접근성의 구조가 통행량에 전적으로 영향을 미치지 않음을 의미하는 것이다. 즉, 현재 수도권 지하철망을 이용자의 통행흐름에는 역 주변의 토지이용 및 시설분포가 크게 작용하고 있음을 나타내는 것으로 볼 수 있다.

5. 결론

교통망의 연결망 구조는 네트워크를 구성하고 있는 정점들 간 연결의 효율성 및 용이성과 관련 된 것

으로 그를 통한 통행흐름에 영향을 미친다. 따라서 수도권 통행의 1/3이상을 분담하는 수도권 지하철망의 구조분석은 수도권 지역의 공간구조를 이해에 매우 유용한 정보를 제공할 것이다. 특히 교통망을 통하여 다른 지점들로부터 또는 다른 지점으로 도달하기 용이한 정도를 나타내는 접근성은 통행수요의 가늠자가 될 수 있으며, 한 장소가 주변지역에 대해 지니게 되는 입지의 상대적 우위성을 나타내는 것으로 자가형성의 기본요소이며, 결과적으로 도시 시설물의 공간적 분포에 직접적인 영향을 미친다. 따라서 교통망의 접근성의 구조와 통행흐름의 관계분석은 교통연구는 물론 다양한 도시시설 입지연구 및 공간경제 연구에 매우 유용한 정보를 제공할 수 있다.

본 연구에서는 수도권 지하철 망의 구조적 특성을 연구하기 위하여 복잡계 시스템을 연구해오던 통계물리학에서 연결망의 특징을 나타내기 위해 적용하는 다양한 지수들을 이용하였다. 이를 위하여 수도권 지하철 망을 점과 선으로 구성되는 네트워크로 구성하고, 네트워크의 복잡성 분석에서 계산하는 다양한 지표들을 산출하여 그에 대한 해석을 시도하였다. 특히 지하철역의 위치정보를 바탕으로 역 사이의 경로거리와 실제거리에 대해 최단경로를 탐사하는 알고리즘을 개발하고, 이를 통하여 얻어진 수도권 지하철 연결망의 최단거리의 분포 구조를 분석하였다. 특히 본 연구에서는 수도권 지하철망의 접근성 구조와 지하철 이용자의 통행흐름을 비교분석하였다. 이를 위하여 수도권지하철망 상 각 정점에 대해 접근성을 산출하고, 실제로 이를 이용하여 통행하고 있는 대중교통 이용자들의 통행기록을 담은 교통카드 트랜잭션 데이터베이스에서 탐사된 통행패턴과 비교하였다. 특히 최단거리를 바탕으로 수도권 지하철망을 통하여 각 역에서 다른 모든 역들에 도달하기 용이한 정도를 의미하는 접근성을 산출하는 알고리즘을 개발하고 그의 적용으로 얻어진 접근성 값의 공간적 구조를 분석하였다. 또한 교통카드를 이용해 움직이는 수도권 대중교통이용자의 통행기록을 담고 있는 대용량 교통카드 트랜잭션 데이터베이스로부터 수도권

지하철망의 구조적 특징을 찾아내기 위한 알고리즘을 개발하고, 그의 적용으로 얻어진 통행량의 구조를 지하철 연결망의 구조와 비교분석하였다. 특히 수도권 지하철망의 접근성구조와 실제지하철 통행량의 관계를 비교분석하기 위하여 GIS를 이용하여 공간적 구조를 지도화 하여 그 공간적 구조를 비교분석하였다.

수도권 지하철망은 1998년 2기 지하철망 이후 새로운 노선들이 추가되고 일부 노선이 확장되면서 수도권 지하철망의 접근성 구조에 상당한 변화가 있음을 보여주고 있다. 1998년 2기 지하철망 이후 10여년간 지하철망이 계속 확충되면서 전체적으로 수도권 지하철망에서 지하철역들 접근성 값이 높아지고 격차가 크게 줄어들었다. 또한 공간적인 구조에 있어서도 1998년 당시에 비하여 현재 수도권 지하철망의 접근성은 도심에 중심을 가지고 있기는 하지만 외곽으로 상당한 거리까지도 비교적 높은 값을 보이며, 좀더 도심원에 유사한 분포 구조를 보인다. 그러나 도심원 구조에 가까운 공간적 구조를 보이는 수도권 지하철망의 접근성과는 달리 실제 지하철 이용자의 통행흐름은 분산 집중하는 공간적 구조를 나타낸다. 또한 통행량 상위 역들과 접근성 값이 높은 역들이 일치하지 않고 차이를 보이는데 이는 현재 실제 지하철 통행흐름에는 수도권 지하철망이 제공하는 위상학적 접근성 구조 뿐 만 아니라 그 밖의 요소들이 강하게 작용하고 있음을 알 수 있다. 즉 지하철 연결망을 이루는 지하철역들은 주변의 토지이용에 따라 인구규모와 통행유발 수요를 각기 달리하며, 또한 그들을 연결하는 교통로의 길이, 통행시간, 배차간격 등에 차이가 있어 단순히 그래프적인 접근성의 구조가 통행량에 전적으로 영향을 미치지 않음을 의미하는 것이다. 오히려 현재 수도권 지하철망을 이용자의 통행흐름에는 역 주변의 토지이용 및 시설분포가 크게 작용하고 있음을 나타내는 것으로 볼 수 있다.

이러한 연구의 결과는 직접적으로는 교통 승객들의 수요에 부합하는 대중교통 노선 조정 및 배차계획에 직접 이용될 수 있으며, 통행자의 이동거리 및 시

간의 빈도분포함수를 이용하여 대중교통 요금체계 개선방향을 제시하는 등 다양한 교통 관련 연구와 교통정책에 기초가 되는 자료로 활용될 수 있다. 또한 통행흐름과 교통망의 구조에 영향을 받는 토지이용의 공간적 구조를 이해하는 물론 수도권 지역의 지가 분석과 토지이용계획에 이론적 근거를 제시할 수 있으며, 직접적으로는 주택정책이나 토지이용 및 시설 입지 등, 도시계획과 공간 계획을 위한 중요한 기초 자료로 이용될 수 있다. 또한 후에 교통카드 트랜잭션 데이터베이스에서 대중교통이용자의 통행경로를 탐사하여 최단경로와의 합치도를 분석하면 수도권 대중교통이용자들의 통행 효율성 등을 파악할 수 있다.

사사

저자들은 본 논문에 삽입된 지도 작성에 애쓴 성신여자대학교 지리학과 대학원 석사과정 홍지연과 민희화에게 감사드립니다.

주

- 1) 2007년 7월 1일부터 경기도 버스까지 교통카드 적용이 확장되었다. 그러나 본 연구의 분석에서는 2005년 6월 24일 교통카드 트랜잭션 데이터를 사용하고 있어 약 1000만 건의 교통카드 거래기록이 이용되었다.
- 2) 본 연구에 사용된 는 자료는 2007년 5월 16일 교통카드의 거래자료이다.
- 3) 2007년 현재 수도권 지하철망에는 모두 424개의 지하철역 ID가 존재하나 교통카드 상 각기 다른 ID로 표시되는 54개 환승 지하철역들은 통합하여 하나의 역으로 인식하였다.
- 4) 2008년 현재 수도권 지하철망의 역의 수는 모든 환승역을 각 노선별로 다른 역으로 정의하면 431개가 되나 환승역들을 하나로 통합하면 380개가 된다.
- 5) SPL에서는 연결된 두 전철역 사이의 거리를 먼저 구하고 연결되지 않은 두 전철역 사이는 무한대로 놓고 SPL 알고리즘을 돌리면 모든 전철역 사이에 shortest path length가 결정된다. 두 전철역 사이의 거리는 위도와 경도가 주

어지면 구할 수 있도록 프로그래밍하여 구하였다.

6) Lee, K. and Lee, H., 1998, "A new algorithm for graph-theoretic nodal accessibility measurement," *Geographical Analysis* 30(1), 1-14. 25.

참고문헌

- 박종수, 이금숙, 2007, "대용량 교통카드 트랜잭션 데이터 베이스에서 통행 패턴 탐사와 통행 행태의 분석", *한국경제지리학회지* 10(1), pp.44-63.
- 이금숙, 1995, "지역접근성 측정을 위한 일반 모형," *응용지리* 18, pp.25-55.
- 이금숙 · 김경숙, 1994, "접근성과 지가의 공간구조: 서울시를 사례로," *응용지리* 17, pp.1-34.
- 이금숙 · 박종수, 2006, "서울시 대중교통 이용자의 통행패턴 분석", *한국경제지리학회지* 9(3), pp.379-395.
- 이금숙, 홍지연, 민희화, 박종수, 2007, "수도권 지하철망 상 통행흐름의 위상학적 구조와 토지이용 패턴", *한국경제지리학회지* 7(4), pp.427-443.
- 허우궁, 2004, "교통지리정보시스템(GIS-T)에 기반한 접근성 분석", *地理學論叢* 43, pp.1-32.
- Albert, R., Jeong, H. and Barabasi, A.-L., 2000, "Error and attack tolerance of complex networks," *Nature* 406, p.378.
- Black, J. and Conroy, M., 1977, "Accessibility measures and the social evaluation of urban structure," *Environment and Planning A* 9, pp.1013-1031.
- Bruinsma, F. and Rietveld, P., 1998, "The accessibility of European cities: theoretical framework and comparison of approaches," *Environment and Planning A* 30, pp.499-521.
- Chen, M. S., Park, J. S. and Yu, P. S., 1998, "Efficient Data Mining for Path Traversal Patterns," *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering* 10(2), pp.209-221.
- Dalvi, M. Q. and Martin, K. M., 1976, "The measurement of accessibility: some preliminary results," *Transportation* 5, pp.17-42.
- Geertman, S. and Eck, J., 1995 "GIS and models of accessibility potential: an application in planning," *International Journal of Geographical Information Systems* 9(1), pp.67-80.
- Geurs, K. T. & van Wee, B., 2004, "Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: review and research directions," *Journal of Transport Geography* 12, pp.127-140.
- Gould, R., 1998, *Graph Theory*, The Benjamin/Cummings Publishing Company.
- Gutierrez, J. & Urbano, P., 1996, "Accessibility in the European Union: the impact of the Trans-European road network," *Journal of Transport Geography* 4(1), pp.15-25.
- Guy, C. M., 1983, "The assessment of access to local shopping opportunities: a comparison of accessibility measures," *Environment and Planning B* 10, pp.219-238.
- Handy, S. L. & Niemeier, D. A., 1997, "Measuring accessibility: an exploration of issues and alternatives," *Environment and Planning A* 29, pp.1175-1194.
- Hansen, W. G., 1959, "How accessibility shapes land use," *Journal of American Institute of Planners* 25(1), pp.73-76.
- Herrmann, H. J., Hong, D. C. and Stanley, H. E., 1984, "Backbone and elastic backbone of percolation clusters obtained by the new method of 'burning'," *J. Phys. A: Math. Gen.* 17, L261-266.
- Koenig, J. G., 1980, "Indicators of urban accessibility: theory and applications," *Transportation* 9, pp.145-172.
- Kwan, M. P., 1998, "Space-time and integral measures of individual accessibility: a comparative analysis using a point-based framework," *Geographical Analysis* 30(3), pp.191-216.
- Latora, V. and Marchiori, M., 2001, "Efficient Behavior of Small-World Networks," *Physical Review Letters* 87(19), pp.198701-4.
- Latora, V. and Marchiori, M., 2002, "Is the Boston subway a small-world network?," *Physica A*, 314, pp.109-

- 113.
- Lee, K. and Lee, H., 1998, "A New Algorithm for Graph-theoretic Nodal Accessibility Measurement" *Geographical Analysis* 30(1), pp.1-14.
- Lee, K. and Park, J., 2005, "Traversal Pattern Analysis of Transit Users in The Metropolitan Seoul," in the *Proceeding of International Forum on the Public Transportation Reform in Seoul* July 7-8, 2005, Seoul.
- Li, Y., 2007, "Static and Dynamic Complexity Analysis of Urban Public Transportation Network: a Case in Shanghai," *IEEE*, pp. 6376-6379.
- Martellato, D. and Nijkamp, P., 1998, "The concept of accessibility revisited", in Reggiani, A. (ed.). *Accessibility, Trade and Locational Behaviour*. Ashgate: Aldershot, England, pp.17-40.
- Miller, H. J., 1999, "Measuring space-time accessibility benefits within transportation networks: basic theory and computational procedures," *Geographical Analysis* 31(2), pp.187-212.
- Neapolitan, R. and Naimipour, K., 1997, *Foundations of Algorithms using C++ Pseudocode*, Jones and Natlett Publishers.
- Newman, M. E. J., 2003, "The Structure and Function of Complex Networks," *SIAM(Society for Industrial and Applied Mathematics) REVIEW* 45(2), pp. 167-256
- Park, J. S., Chen, M.-S., and Yu, P.S., 1997, "Using A Hash-Based Method with Transaction Trimming for Mining Association Rules," *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering* 9(5), pp. 813-825
- Parongama, S., Dasgupta, S., Chatterjee, A., Sreeram, P. A., Mukherjee, G., and Manna, S. S., 2003, "Small-world properties of the Indian railway network," *Mar, Phys. Rev. E*, American Physical Society 67(3), pp. 036106-036110.
- Pirie, G. H., 1981, "The possibility and potential of public policy on accessibility," *Transportation Research* 4,15(5), pp.377-381.
- van Wee, B., Hagoort, M., and Annema, J., 2001, "Accessibility measures with competition," *Journal of Transport Geography* 9, pp.199-208.
- Watts, D. J. and Strogatz, S. H., 1998, "Collective dynamics of 'small-world' networks," *Nature* 393(6684), pp. 440-442.
- 교신: 이금숙, 서울특별시 성북구 동선동 3가 249-1, 성신여자대학교 사회과학대학 지리학과, Tel: 02)920-7138, E-mail: kslee@sungshin.ac.kr
- Correspondence: Keumsook Lee, Department of Geography, Sungshin Women's University, 249-1 Dongseon-dong 3-ga, Seongbuk-gu, Seoul 136-742, Korea, Tel: 02)920-7138, E-mail: kslee@sungshin.ac.kr

최초투고일 2008년 6월 23일

최종접수일 2008년 8월 5일

Network Structures of The Metropolitan Seoul Subway Systems

Jong Soo Park* · Keumsook Lee**

Abstract : This study analyzes the network structure of the Metropolitan Seoul subway system by applying complex network analysis methods. For the purpose, we construct the Metropolitan Seoul subway system as a network graph, and then calculate various indices introduced in complex network analysis. Structural characteristics of Metropolitan Seoul subway network are discussed by these indices. In particular, this study determines the shortest paths between nodes based on the weighted distance (physical and time distance) as well as topological network distance, since urban travel movements are more sensitive for them. We introduce an accessibility measurement based on the shortest distance both in terms of physical distance and network distance, and then compare the spatial structure between two. Accessibility levels of the system have been getting up overall, and thus the accessibility gaps have been getting lessen between center located subway stops and remote ones during the last 10 years. Passenger traffic volumes are explored from real passenger transaction databases by utilizing data mining techniques, and mapped by GIS. Clear differences reveal between the spatial patterns of real passenger flows and accessibility. That is, passenger flows of the Metropolitan Seoul subway system are related with population distribution and land use around subway stops as well as the accessibility supported by the subway network.

Keywords : complexity analysis, network structure, data mining, shortest path, accessibility, GIS, real passenger flow volume

* Professor, School of Computer Science & Engineering, Sungshin Women's University

** Professor, Department of Geography, Sungshin Women's University