

수도권 광역철도망 확충에 따른 서울 대도시권 접근도 변화: 교통카드 빅데이터를 이용한 시간거리 산출 알고리즘 및 비고정성 교통망 접근도 산출 모형의 개발과 적용

이금숙* · 박종수** · 정미선***

Accessibility Changes in the Metropolitan Seoul Subway System: Time-distance Algorithms based on the T-card Big Data and an Accessibility Measurement Model for Un-fixed Transportation Networks

Keumsook Lee* · Jong Soo Park** · Mi Seon Jeong***

요약 : 본 연구의 목적은 2000년대 이후 수도권 광역철도망 확충에 따른 서울 대도시권 접근성의 변화를 분석하는 것이다. 이를 위하여 수도권 광역철도망과 같이 노선의 신설이나 확충으로 지속적으로 변화하는 비고정성 교통망의 세 가지 거리비용을 중심으로 하는 접근도 산출모형을 제시한다. 특히 도시민의 통행에서 중요하게 작용하지만 자료 구득의 한계로 제한되었던 시간거리 접근도를 산출하기 위하여 교통카드 통행거래 빅데이터를 이용하여 역과 역 사이의 시간거리(time distance)산출 알고리즘을 제시한다. 수도권 지역에서 교통카드가 본격적으로 도입된 이후의 두 시점 2005년과 2011년의 동일한 조건을 가진 주중 평일 하루치 교통카드 통행자료를 이용하여 수도권 광역철도체계의 세 가지 거리비용 접근성을 산출하고 그 결과를 비교분석한다.

주요어 : 수도권 광역철도망, 비고정성 교통망, 접근도 산출 모형, 빅데이터, 시간거리, 접근성 변화

Abstract : The purpose of this study is to investigate the changes in the accessibility of the Metropolitan Seoul Transit systems since 2000, in which many new subway lines have been constructed as well as other urban transit lines have been connected to the systems. We suggest an accessibility measure model for Un-fixed Transportation Networks. In order to measure the nodal accessibility based on the mobility, we apply path-distance, physical-distance, and time-distance as the distance impedance measurement. Specifically, we develop time-distance algorithms to measure the time-distance between each pairs of transit stations based on the T-card transaction databases. We apply the model to the Metropolitan Seoul Transit systems in two time points(2005 and 2011). We examine the results in terms of three distance accessibility measures. Time-distance accessibility explains better the urban land use patterns in the Metropolitan Seoul area than the other two. We visualize the spatial patterns of time-distance accessibility by applying

이 논문은 2012년도 성신여자대학교 학술연구조성비 지원에 의하여 연구되었음.

* 성신여자대학교 지리학과 교수(Professor, Department of Geography, Sungshin Women's University, kslee@sungshin.ac.kr)

** 성신여자대학교 IT학부 교수 (Professor, School of IT, Sungshin Women's University)

*** 성신여자대학교 지리학과 대학원생(Graduate Student, Department of Geography, Sungshin Women's University)

GIS, and analyze the spatial structures of accessibility in the Metropolitan Seoul area between two time points.

Key Words : Metropolitan Seoul Transit systems, unfixed-transportation networks, accessibility measurement models, big data, time distance, changes in the spatial structures of time-distance accessibility

1. 서론

도시시설의 입지는 이를 이용하는 도시민들의 접근 가능성에 결정적인 영향을 받는다. 그러므로 지표공간을 연구하는 지리학 및 도시경제학에서는 전통적으로 접근성을 근간으로 입지론 및 지가이론을 수립하고 토지이용과 의 관계성을 밝히려는 연구가 활발히 진행되어 왔다(Hansen, 1959; Huff, 1964; Lakshmanan and Hansen, 1965; Stegman, 1969; Wachs and Kumagai, 1973; Black and Conroy, 1977; Davidson, 1977; Bach, 1980, 1981; Guy, 1983; Rushton, 1984; Handy, 1993; Shen, 1998; Stanilov, 2003; Kwan and Weber, 2008; Lee *et al.*, 2012; Song *et al.*, 2012).

도시 공간에서 이동은 교통망을 따라 이루어지므로 도시 공간의 접근성은 그 도시의 교통망 구조와 교통체계의 영향을 받게 된다. 따라서 도시의 통행흐름과 토지이용패턴 및 공간구조를 정확히 이해하고 효과적인 도시교통계획이나 도시계획을 수립하기 위해서는, 그 도시의 교통망 구조와 이를 통해 연결되는 지점들의 접근성을 정확히 측정하는 작업이 선행되어야 한다(Hansen, 1959). 더욱이 도시민의 통행에 기반이 되는 주요 교통망이나 교통체계에 괄목할 만한 변화가 있게 되면 일차적으로 그에 따른 접근성의 변화를 파악하는 작업이 도시 공간구조 연구 및 입지 분석과 계획수립에서 요구된다.

도시철도는 우리나라 인구의 절반 이상이 모여

살고 있는 수도권지역에서 경제성과 편리성 및 정시성의 장점 때문에 도시민들이 일상생활을 영위하기 위하여 공간이동 할 때 가장 애용하는 교통수단이다. 따라서 수도권 광역철도망으로 주어지는 접근성은 수도권 도시민들의 통행흐름은 물론 도시민들이 이용하는 각종 도시시설의 입지선택에도 크게 작용하여 서울 대도시권의 토지이용패턴 형성에 결정적인 역할을 해 왔다(이금숙 외, 2007, 2010; Lee and Lee, 1998). 이러한 수도권 광역철도망은 1974년 지하철 1호선이 시청역과 청량리 사이에 개통된 이후 지금까지 여러 차례 확충과정을 거치면서 각 시기마다 수도권 광역철도망으로 주어지는 접근성의 변화에 따라 수도권 지역의 정주체계와 지가 및 토지이용패턴을 크게 변화시켜 왔다(Lee & Lee, 1998). 최근 서울시는 현재 상황에서 도시철도가 가장 지속가능한 교통수단이라고 판단하고 경전철과 기존 지하철 연장 노선 등 10여개의 노선을 추가하는 등 앞으로도 수도권 광역철도체계를 지속적으로 확충하여 대중교통의 수송 분담률을 2020년에는 75%까지 끌어 올린다는 계획을 발표하였다. 따라서 서울 대도시권의 토지이용패턴 및 공간구조에 나타날 변화를 정확히 예측하고, 그를 바탕으로 좀 더 효과적인 도시계획을 수립하기 위해서는 지속적으로 확충되는 수도권 광역철도망에서의 이동성을 바탕으로 하는 접근성의 변화를 정확히 파악할 수 있는 접근도 측정이 요구된다.

본 연구의 목적은 2000년대 이후 신분당선, 9호선, 공항철도 등이 신설되고, 경춘선과 중앙선 등

기존 철도노선들이 정비 및 전철화되어 수도권 지하철 망에 연결되면서 크게 확장된 수도권 광역철도 체계의 접근도 변화를 분석하는 것이다. 이를 위하여 본 연구에서는 2004년 7월 1일 서울시 대중교통체계 개편과 함께 대중교통이용에 교통카드가 본격적으로 도입된 이후의 두 시점인 2005년과 2011년의 수도권 광역철도망의 접근도를 산출하고 그 변화를 분석한다. 먼저 수도권 광역철도망과 같이 노선의 신설이나 확충으로 지속적으로 변화하는 비고정성 교통망에서 세 가지 거리비용을 적용하여 접근도를 산출하기 위한 접근도 측정모형을 제시한다. 특히 본 연구에서는 도시민의 통행에서 가장 중요하게 작용하지만 자료 구득의 한계로 인해 측정이 어려웠던 역과 역 사이의 시간거리(time distance)를 산출하고, 이를 적용하여 시간거리 접근도를 계산한다. 이를 위하여 수도권 광역철도망을 이용하는 도시민들이 실제 이동하면서 만들어 내는 교통카드 트랜잭션 데이터베이스에서 역과 역 사이의 시간거리(time distance)를 산출하는 알고리즘을 제시한다. 2005년과 2011년 각각 동일한 조건을 가진 평일 하루치 교통카드 통행자료를 이용하여 수도권 광역철도 체계의 세 가지 거리비용 접근성을 산출하고 그 결과를 비교 분석한다. 특히 서울대도시권 지역의 공간구조 변화를 이 지역의 토지이용패턴에 관련이 깊은 시간거리 접근도 값을 GIS를 이용하여 시각화하여 두 시점의 시간거리 접근성의 공간적 패턴과 구조의 변화를 분석한다.

2. 비고정성 교통망 상 결절점의 접근도 산출 모형 개발

주어진 교통망으로 연결되는 결절점들의 접근성 정도를 나타내는 지표로 사용되는 접근도(accessibility)를 정확히 산출하면 특정 지점의 토지

가 지니는 상대적인 가치는 물론 그에 합당한 토지이용 및 입지계획 등 계량적 분석이 가능하다. 따라서 지역 교통과 토지이용 및 입지를 연구하는 많은 연구자들이 접근도 산출을 위한 지표개발을 위하여 많은 노력을 경주해 왔다(Hansen, 1959; Ingram, 1971; Sherman *et al.*, 1974; Baxter and Lend, 1975; Dalvi and Martin, 1976; Kirby, 1976; Pine, 1979; Moms *et al.*, 1979; Koenig, 1980; Jones, 1981; Richardson and Young, 1982; Allen *et al.*, 1993; Song, 1996; Lee and Lee, 1998; Handy and Niemeier, 1997; Giuliano, 2004; 김소연·이금숙, 2006; Lee *et al.*, 2012).

접근도(accessibility)는 제품, 장치, 서비스 또는 환경 등에 사람들이 접근할 수 있는 용의성의 정도를 기술할 때 두루 사용된다. 따라서 접근도의 개념이나 측정 방법은 연구의 목적이나 대상에 따라 상당한 차이를 보인다. 접근성의 개념을 주어진 교통망으로 연결된 각 결절점들의 입지의 상대적 우위성을 나타내는 지표로 한정한다고 하여도 접근도는 다시 교통망의 연결상태 만을 고려할 것인지, 아니면 연결되는 결절점들의 속성까지도 고려할 것인지에 따라 의미와 측정방법이 달라진다(이금숙, 1996). 이처럼 접근도의 측정은 연구의 목적이나 대상에 따라 다소 차이가 있을 수 있으나 일반적으로 식 (1)으로 나타낼 수 있다(Reggiani, 1998).

$$A_i = \sum_j D_j \times f(c_{ij}) \quad (1)$$

여기서 A_i 는 분석 장소 i 의 접근도, D_j 는 목적지 j 에서의 기회(opportunity)나 활동(activity)의 측정치나 가중치, $f(c_{ij})$ 는 장소 i 에서 장소 j 까지 임피던스 함수(impedance function)를 표시한다. 그러나 접근도를 지표상의 한 지점이 주변의 다른 지점들로부터(혹은 다른 지점으로) 도달하기 쉬운 정도를 나타내는 개념으로 정의할 때 식 (2)와 같이 표현해도 무방하다.

$$A_i = \sum_j f(c_{ij}) \quad (2)$$

여기서 임피던스 함수 $f(c_{ij})$ 는 주로 한 장소에서 다른 장소로 이동하는데 필요한 거리비용으로 간주되며 분석 대상이나 연구 목적에 따라 다양한 비용함수로 대체 할 수 있다.

일반적으로 주어진 교통망에서의 이동성을 중심으로 접근성을 파악하기 위해서는 식 (3)과 같이 주어진 교통망으로 연결되는 결절점들이 교통망 상의 다른 모든 결절점에 도달하는데 극복해야 하는 거리(c_{ij})의 합으로 접근도를 산출한다(Shimbel, 1953):

$$A_i = \sum_{j(i \neq j)}^n c_{ij} \quad (3)$$

A_i 는 각 결절점이 주어진 교통로를 통해 그 교통망에 있는 모든 결절점에 닿기 위해 요구되는 최소통행거리(비용)가 된다. 따라서 이 경우 주어진 교통망에서 접근성이 좋은 결절점일 수록 A_i 값은 작다.

그러나 우리나라 수도권 광역철도체계와 같이 지속적으로 확충과정을 거쳐 오고 있는 비고정성 교통망에 대해서 결절점들의 접근성을 산출하고, 그 변화 정도를 비교 분석하려고 할 때 위의 식 (3)으로 접근도를 측정하면 문제가 발생한다. 비고정성 교통망의 경우 새로운 노선의 신설이나 확충으로 이동성이 개선되어 결절점들 사이의 비용거리는 감소될 수 있지만, 다른 한편으로는 이전에 연결이 되지 않던 결절점들이 새로이 추가되어 교통망을 구성하는 모든 결절점들까지의 비용거리의 합은 오히려 증가하게 된다. 즉, 교통망의 확충으로 교통망상의 모든 결절점들의 접근성이 크게 개선된 상황이지만 새로 추가된 결절점들까지의 거리비용이 추가되어 최단거리비용은 오히려 증가되는 양상이 나타난다. 특히 교통망 확충으로 새로이 교통망에 연결되는 결절점들의 경우 앞선 시점의 교통망 상에서는 연결이 없어 거리 값이

∞ 에 해당하므로 이들을 그대로 더하면 접근도 값도 ∞ 가 되므로 변화를 비교할 수 없게 된다. 따라서 수도권 광역철도망과 같은 비고정성 교통망의 접근도 변화를 분석하기 위해서는 기존 접근도 측정 모형의 수정이 필요하다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 논문에서는 교통망의 지속적인 확장으로 교통망의 연결선이 증가함과 동시에 새로운 결절점들이 추가되는 비고정성 교통망의 접근도 측정 모형으로 식 (4)를 제시한다.

$$A_i = B \sum_{j(i \neq j)}^n c_{ij}^{-1} \quad (4)$$

여기서 c_{ij} 는 교통망 상의 결절점 i 와 j 사이의 거리비용이고 B 는 크기 조정 상수이다. 한 결절점에서 다른 모든 결절점까지 최단비용거리의 역수를 모두 더한 값을 접근도로 측정하므로 이 경우 접근성이 좋을수록 A_i 값은 크다. 특히 앞선 시점에 교통망에 연결되지 않았던 결절점들은 $1/\infty=0$ 으로 처리되며, 교통망이 확충된 시점에는 새로 추가된 선로로 최단비용거리가 줄어든 경우 역수의 값이 커지게 되어 접근도의 향상을 측정할 수 있게 된다. 또한 새로 연결된 결절점들 때문에 최단거리비용이 증가하게 되어도 그 역수는 오히려 작아지게 되므로 새로 추가된 결절점들 때문에 왜곡되었던 식 (3)의 문제가 해결된다.

3. 수도권 광역철도망 상 이동성을 중심으로 한 접근성 산출 알고리즘

1) 수도권 광역철도망의 거리비용

접근도의 계산에 어떤 거리비용을 적용하느냐에 따라 접근성의 공간구조가 다소 차이를 보일 수 있으므로 교통망의 성격과 특징에 따라 적절

한 거리비용이 적용되어야 한다. 이제까지 교통망으로 주어지는 이동성을 바탕으로 접근성의 정도를 측정하기 위하여 적용한 거리비용은 교통망의 경로거리(path distance)나 물리적 거리(physical distance), 혹은 비용 거리(cost distance) 등 이다 (Taaffe *et al.*, 1996).

수도권 광역 철도체계와 같은 선로 교통망으로 주어지는 각 역의 접근도를 계산할 때 한 역에서 다른 역으로 이동하는 거리비용으로 고려할 수 있는 것은 통과역 수, 선로 길이, 요금, 시간 등을 고려할 수 있다. 이들 중에서 통과역 수로 측정하는 경로거리와 선로 길이로 측정하는 물리적 거리는 지하철역의 위치 정보와 노선 정보가 있으면 어느 정도 쉽게 구할 수 있는 비용이어서 서울 수도권 지하철 시스템에서 앞서 연구된 바 있다(Lee and Lee, 1998). 이에 반하여 요금은 구간제로 책정하고 있어 역간의 비용거리를 왜곡 시키므로 이동성을 바탕으로 하는 접근도 산출에는 그다지 적합치 않으며, 시간거리 비용은 지하철 승객들의 실제 이동경로 및 출발시간과 목적지 도착시간에 대한 정보의 부재로 산출하기 어려웠다.

그러나 수도권 광역철도체계는 서울시뿐만 아니라 경기도는 물론 강원도, 충청남도에도 까지 확장되어 있어 역과 역 사이의 시간거리가 짧은 경우 2분 이내에서 긴 경우는 2시간 이상 까지 걸리는 등 그 차이가 매우 크다. 바쁜 일상을 살고 있는 현대 도시인에게 시간은 매우 중요한 가치를 지니므로(Song *et al.*, 2013) 수도권 인구의 공간이동에서 시간거리는 매우 중요하게 작용할 것이다. 따라서 수도권 광역철도망의 접근도는 역 간의 시간거리를 적용하여 측정할 필요가 있다.

2) 교통카드 통행기록 빅데이터를 이용한 시간거리 산출 알고리즘

서울대도시권에서는 2004년 7월 대중교통체계 개편과 함께 교통카드가 본격적으로 도입되면서

서울대도시권 인구가 대중교통을 이용하며 공간 이동을 할 때 그들의 통행패적을 담은 통행기록이 교통카드의 트랜잭션 데이터베이스에 저장·보관되고 있다. 이는 2천만 명이 넘는 서울대도시권 인구의 하루 일상생활을 영위하며 만들어내는 전체 통행의 2/3에 해당하는 것으로 개개 통행의 시·공간 정보를 포함한 다양한 정보를 담고 있는 빅데이터이다. 본 논문에서는 교통카드 통행기록 빅데이터에서 도시철도를 사용한 승객들의 이동 시간을 계산해내어 각 지하철역에서 다른 모든 지하철역까지의 평균 이동 시간을 계산하여 시간거리를 바탕으로 수도권 광역철도망 상의 각 역의 접근도를 계산하는 방법을 제시하고자 한다.

시간거리에 기반한 접근도를 계산하기 위해서는 한 역에서 출발하여 모든 다른 역까지 도달하는 이동 시간을 알아야 한다. 서울 지하철 시스템에서 지하철역 간 이동시 통과하는 역의 개수로 나타내는 경로거리 l_{ij} 와 두 역 사이에 최단 경로를 찾아서 실제로 이동하는 물리적인 거리 l_j 는 지하철의 노선정보와 지하철역의 위치 정보가 있으면 구할 수 있지만, 이동 비용인 시간거리 d_{ij} 는 쉽게 구할 수가 없다. 승객이 출발역에서 도착역까지 가려고 할 때 한 노선에서만 지하철을 타고 내리는 것이 아니라 환승역을 통해서 다른 지하철 노선으로 갈아타고 원하는 도착역으로 갈 수도 있다. 그러면 각 환승역에서 승객이 환승하기 위해서는 도보로 이동하고 있으므로, 환승할 때 승객 개인의 도보 속도에 따라 환승 시간이 결정된다. 젊은이는 빠른 걸음으로 5분 이내에 환승을 하고 노인은 느린 걸음으로 10분 이상의 시간으로 환승을 할 수도 있다. 그래서 한 역에서 다른 역으로 이동하는 시간거리를 구하기 위해서는 각 환승역의 평균적인 환승 시간을 구해야 할 필요가 있다.

그림 1은 지하철 승객이 출발역 A에서 도착역 D까지 가는 최단 경로에서 환승역에서 다른 노선으로 갈아타는 경우를 설명하고 있다. 이 그림에서 세 가지 종류의 접근도를 계산하기 위한 교통비용

을 설명한다. 먼저, 두 역 사이에 통과한 역의 개수인 그래프-거리 $h_{AD}=4$ 가 되는데 환승역 C와 D는 하나의 통과역으로 간주된다. 두 번째로, 두 역 사이의 실제 거리는 역 A와 D 사이에서 통과하는 각 역의 중심점의 지리좌표상의 거리를 합한 길이 l_{AD} 가 된다. 마지막으로 두 역 사이의 시간-거리는 계산하는 과정이 조금 복잡하여 몇 가지 이동 시간에 대해서 설명이 필요하다. 한 승객이 출발역에서 도착역까지 가는데 걸리는 시간을 특성별로 나누어보면 다음과 같다:

- t_w : 승객이 출발역에 카드로 개찰하여 전동차를 승차할 때까지 기다리는 시간 t_{w1} 과 도착역에서 전동차를 하차한 후에 교통 카드로 개찰구를 빠져 나오는 시간 t_{w2} 를 합한 시간을 나타낸다.
 - t_{s1} : 출발역 A에서 전동차를 승차하여 환승역 B에서 하차할 때 까지 시간으로, 역 A와 역 B 사이의 이동거리를 이 노선의 전동차의 평균 속도로 나누어 계산한다.
 - t_r : 환승역 B에서 다른 노선의 환승역 C까지 보통 도보로 이동하는데 걸리는 시간을 적용한다.
 - t_{s2} : 환승역 C에서 전동차를 승차하여 도착역 D에서 하차할 때 까지 시간으로, 역 C와 역 D 사이의 이동거리를 이 노선의 전동차의 평균 속도로 나누어 계산한다.
- 그러므로 지하철역 A에서 역 D까지의 시간거리는 승객이 지하철역 A에서 교통카드로 개찰한

시간부터 지하철역 D에서 교통카드로 요금을 지불하는 개찰구를 나오는 데까지 걸리는 시간으로 $d_{AD}=t_{s1}+t_r+t_{s2}+t_w$ 로 계산할 수 있다. 실제 교통카드 트랜잭션에서 어떤 역과 역 사이의 시간거리를 실제 승차시간과 하차시간을 기준으로 구해보면 조금 부적합한 경우도 발생한다. 예를 들면, 1호선 석수역에서 종로3가역의 평균 이동 시간이 석수역에서 종로5가역의 평균 이동시간보다 큰 경우가 발생한다. 실제 거리는 석수역-종로5가역이 더 먼 경우인데 평균 이동 시간이 짧은 것으로 계산된다. 이것은 종로3가역에서 개찰구를 빠져 나오는 데까지 더 많이 도보로 이동하는 것으로 추정된다. 그래서 모든 역과 역 사이의 합리적인 시간거리를 구하는 방법이 필요하다. 다음은 수도권 지하철 환승역에서 한 노선에서 다른 노선으로 갈아탈 때 걸리는 환승 시간과 거리-시간을 계산하는 알고리즘이다.

Algorithm 1: 시간거리 계산

- Step 1. 서울 수도권 지하철의 역과 연결된 링크로 이루어진 그래프 상에서 각 환승역의 환승시간은 초기값 $t_r=600$ 초로 둔다.
- Step 2. 모든 지하철 역 i 와 j 사이의 이동 시간 t_{ij} 를 정한다.
 - 2.1: 지하철 승객의 교통카드 트랜잭션에서 출발역 ID i 와 도착역 ID j 를 찾아서 t_{ij} 에

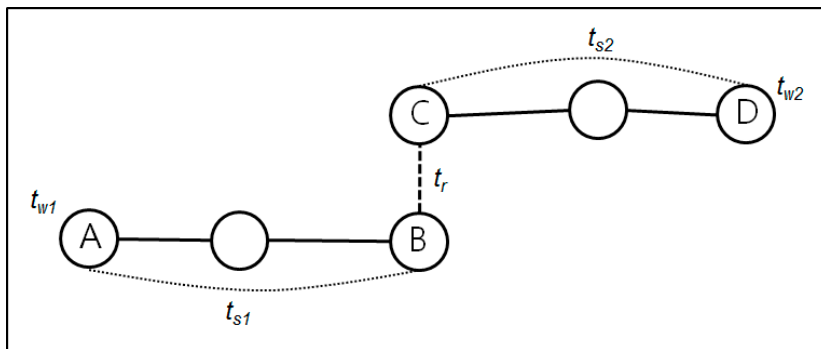


그림 1. 지하철 환승역에서 환승 모델

하차시간에서 승차시간을 뺀 이동 시간으로 저장한다. u_{ij} 는 출발역 i 와 도착역 j 사이에 이동한 승객수를 나타낸다. 모든 승객의 트랜잭션들을 읽고 난 후에 i 와 j 사이의 t_{ij} 의 평균 이동시간 m_{ij} 과 표준 편차 σ_{ij} 를 구한다.

2.2: 지하철 승객의 교통카드 트랜잭션들을 다시 읽어서 이동 시간이 $m_{ij} \pm 2\sigma_{ij}$ 의 범위 이내의 값은 저장하고 이외의 값은 버린다. 저장된 값들로 u_{ij} 와 m_{ij} 를 다시 구하여 지하철역 i 와 j 사이의 t_{ij} 의 이동 시간은 다음과 같이 결정된다:

$$t_{ij} = \begin{cases} m_{ij} & \text{if } u_{ij} > \text{threshold,} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Step 3. 시간거리의 표준오차 e_{rmse} 가 최소가 되는 t_w 를 찾는다.

3.1: $t_w=0$, $\min_tw=t_w$, $\min_ermse=+\infty$ 로 둔다.

3.2: 각 지하철 노선의 평균 속도를 구한다. 지하철 트랜잭션들 중에서 중도에서 환승하지 않고 도착역까지 가는 것을 찾아서 해당 노선의 전동차의 속도를 계산한 후에 각 지하철 노선의 평균 속도를 구한다. 지하철 노선 k 의 속도 $s_k = \text{dist}_{ij} / (t_{ij} - t_w)$. 해당 트랜잭션의 출발역 i 와 도착역 j 이고 이동 시간은 t_{ij} 로 보고 이동한 지하철 노선번호는 k 이고 dist_{ij} 는 역 i 와 j 사이의 최단 경로상의 실제 거리이다.

3.3: 각 환승역의 평균 환승 시간을 구한다. 지하철 트랜잭션들 중에서 중도에 한 번 환승하는 것을 찾아서 환승역의 환승시간을 계산한 후에 각 환승역의 평균 환승 시간을 구한다. 환승역의 환승시간 $t_r = t_{ij} - (t_{i1} + t_{i2} + t_w)$. 해당 트랜잭션의 이동 시간을 t_{ij} 로 두고 앞에서 구한 해당 지하철 노선의 평균 속도를 이용하여 출발역 i 에서 환승역

까지 이동시간 t_{i1} 과 환승역에서 도착역 j 까지 이동 시간 t_{i2} 를 계산하여 t_r 을 구한다.

3.4: 모든 출발역 i 와 도착역 j 사이의 시간-거리를 계산한다.

$$d_{ij} = (\text{최단경로 상의 이동 시간}) + (\text{최단경로 상의 환승 시간}) + t_w$$

출발역 i 와 도착역 j 사이의 실제 거리는 최단 경로 상으로 지하철역 좌표로 구하고 해당 지하철 노선의 평균 속도를 적용하여 이동 시간을 구하고, 최단 경로 상에 환승역이 있으면 해당 환승역의 평균 환승 시간을 적용한다.

3.5: 다음 식으로 오차값을 계산한다.

$$e_{rmse} = \sqrt{\frac{1}{n_t} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (t_{ij} - d_{ij})^2}$$

여기서 n 은 지하철역의 개수이고, n_t 는 t_{ij} 가 0이 아니어서 식의 $(d_{ij} - t_{ij})^2$ 에 계산되어진 항들의 개수를 나타낸다.

if ($\min_ermse > e_{rmse}$) { $\min_ermse = e_{rmse}$, $\min_tw = t_w$ 로 둔다.}

3.6: $t_w = t_w + 5$ 로 설정하고, 만약 $t_w \leq 480$ 이면 Step 3.2로 간다.

Step 4. $t_w = \min_tw$ 로 설정한 후 Steps 3.2, 3.3, 3.4를 다시 수행하여 각 지하철 노선의 평균 속도, 모든 환승역의 평균 환승 시간, 그리고 모든 역과 역 사이의 시간-거리 d_{ij} 를 다시 계산한다.

3) 수도권 광역철도망의 세 가지 거리비용에 따른 접근성 산출 알고리즘

도시철도망의 이동성을 중심으로 철도망 상에 있는 역들의 접근도 산출을 위해서 두 지하철역 사이의 교통비용은 세 가지로 고려해 볼 수 있다. 통과역의 수 지하철역에서 지하철역 사이로 이동할 때 통과하는 역의 개수로 이동 비용으로 하고, 둘째로 두 역 사이에 최단 경로를 찾아서 실제

로 이동하는 물리적인 거리를 이동 비용으로 한다. 세 번째로 고려할 수 있는 것은 한 역에서 다른 역까지 이동하는데 걸리는 시간을 시간거리 개념으로 이동 비용으로 하여 접근도를 계산하는 것이다.

본 연구에서는 교통카드 트랜잭션 데이터베이스에서 한 역과 다른 역 사이의 세 가지 거리비용을 산출하여 임피던스 함수에 포함시켜 접근도를 산출하는 알고리즘 개발을 위해 다음과 같이 용어를 정의한다. 첫째, 두 역 사이에 통과한(hopping) 역의 개수인 그래프거리(graph-distance)를 교통비용 h_{ij} 로 하고 각 역 i 의 접근도를 A_i^{hop} 로 둔다. 둘째, 두 역 사이에 이동한 실제 거리(physical distance)를 비용 l_{ij} 로 하고 역 i 의 접근도를 A_i^{length} 로 둔다. 이 경우에는 두 역 사이의 최단 경로를 계산한다. 셋째, 두 역 사이에 승객들이 이동한 시간거리(time-distance)를 교통비용 d_{ij} 로 한 경우이고 역 i 의 접근도를 A_i^{time} 으로 둔다.

앞 절에서 정의한 비교정성 교통망 상 결절점의 세 가지 종류의 접근도를 계산하기 위한 알고리즘은 다음과 같다.

Algorithm 2: 접근도 계산

- Step 1. 서울 수도권 지하철 시스템에서 모든 출발 역과 도착역 사이의 최단 경로를 구하기 위하여, 각 역과 노선에 관한 정보를 입력받는다.
- Step 2. 지하철 시스템의 역과 노선 정보로 하나의 그래프로 변환하여, Shortest Path Algorithm (Sedgewick, 2002)에 따라 모든 역과 역 사이의 최단 경로를 구한다.
- Step 3. 모든 역과 역사이의 통과한 역들의 개수 h_{ij} 와 두 역 사이의 이동한 실제 거리 l_{ij} 는 최단 경로 상에서 계산하여 다음과 같이 각 지하철 역 i 의 접근도 A_i^{hop} 과 A_i^{length} 를 계산한다:

$$A_i^{hop} = \sum_{i \neq j} \frac{1}{h_{ij}} \text{ 와 } A_i^{length} = \sum_{i \neq j} \frac{1}{l_{ij}}$$

- Step 4. Algorithm 1에 따라 모든 역과 역 사이의 시간거리 d_{ij} 를 구한 후에 각 지하철역 i 의 접근도 A_i^{time} 을 계산한다:

$$A_i^{time} = \sum_{i \neq j} \frac{1}{d_{ij}}$$

4. 수도권 광역철도망의 접근도 산출과 변화 분석

1) 수도권 광역철도망의 확충 과정

수도권 광역철도망은 1974년 지하철 1호선 개통 이후 1984년에 지하철 2, 3, 4호선이 개통되어 10년 동안 운영되었으며, 1994년부터는 지하철 5, 6, 7, 8호선 개통 이후에도 지속적으로 확충작업이 이루어져 2,000만 명이 넘는 수도권 도시민들의 통행에서 핵심적인 역할을 하는 교통체계에 자리 잡게 되었다. 특히 2000년대에 들어서는 새로이 9호선 및 분당선의 신설과 함께 인천지하철, 공항철도, 경춘선, 중앙선, 경원선 등이 연결되어 서울을 중심으로 경기, 강원, 충남에 이르는 상당히 광범위한 영역으로 확장되었다. 이에 따라 수도권 지역의 정주체계와 토지이용패턴 및 지가 형성에 지대한 영향을 미치면서 앞으로 수도권 지역의 공간구조를 지속적으로 변화시켜 나갈 것으로 예상된다.

이처럼 지속적인 변화를 겪고 있는 수도권 광역철도망의 접근도를 정확히 측정하여 서울대도시권 접근성의 공간구조 변화를 분석하기 위하여 교통카드 이용이 안정적으로 정착되기 시작한 2005년과 9호선 및 분당선의 신설과 함께 인천지하철, 공항철도, 경춘선, 중앙선, 경원선 등이 연결되어 수도권 광역철도망이 크게 확충된 2011년 서울광역철도망(그림 2 참조)을 대상으로 앞 절에서 제시한 접근도 측정모형을 이용하여 서울대도시권

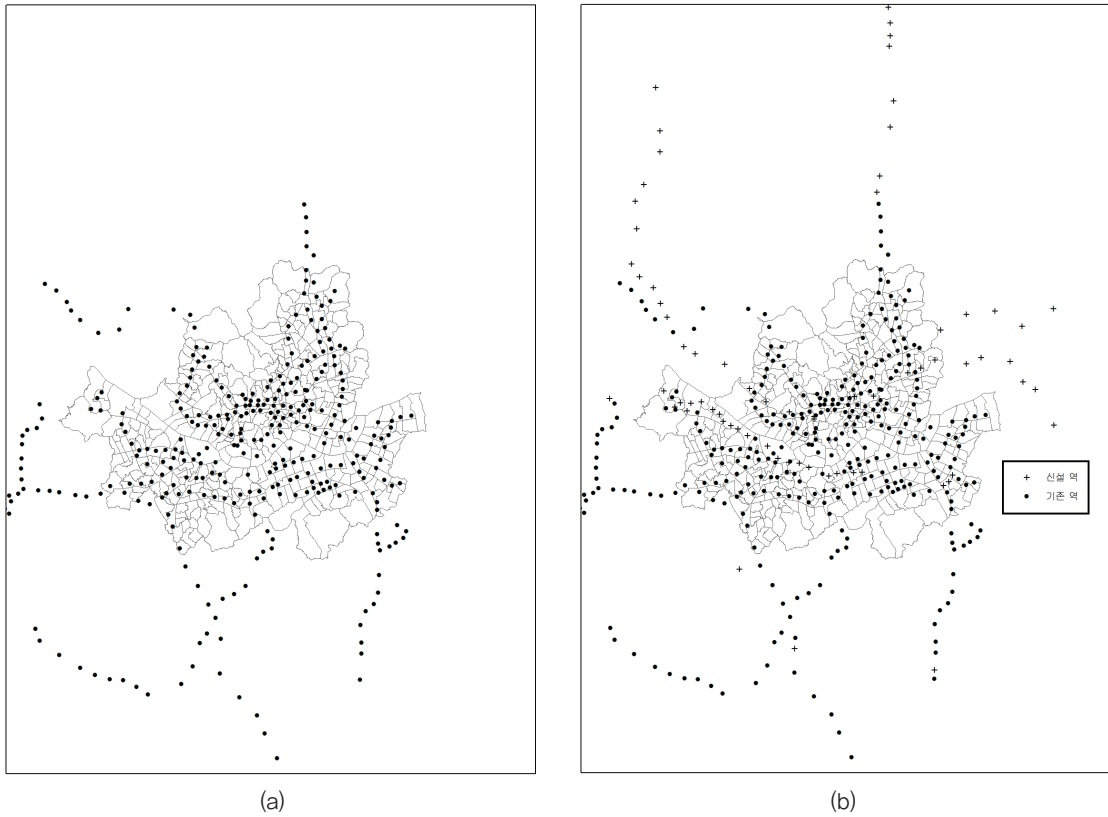


그림 2. 수도권 광역철도망(a: 2005년, b: 2011년)

의 접근성 변화를 분석한다.

2) 접근성 산출 알고리즘의 적용과 결과분석

분석을 위하여 본 연구에서는 교통카드 트랜잭션 데이터베이스에서 특별한 사건이 없었던 2005년과 2011년 봄 평일 하루치 통행자료를 이용하였다. 표 1은 2005년과 2011년 각 하루치의 교통카드 트랜잭션 데이터베이스에서 지하철 트랜잭션들의 수와 그 날짜 기준의 서울 수도권 지하철 시스템에 관한 정보를 정리한 것이다.

표 1에 나타나는 것처럼 수도권광역철도망은 2005년에서 2011년 사이 크게 확장되어 지하철 역

의 개수가 2005년 357개에서 2011년에는 467개로 110개 이상 증가하였다¹⁾. 이는 수도권시민들의 대중교통을 이용한 통행증가에도 반영되어 교통카드를 이용한 통행 트랜잭션 수가 2005년에 비하여 2011년에 30% 정도 증가하였으며, 그의 대부분이 지하철 통행의 증가에 기인한 것임을 알 수 있다.

그림 3은 위의 교통카드 데이터에서 지하철 역간 시간거리를 계산하는 알고리즘 1의 step 3에서 e_{rmse} 가 최소가 되는 값을 찾기 위하여 t_w 의 값을 0초에서 시작하여 5초씩 증가시키면서 480초까지 변화하였을 때 e_{rmse} 의 값의 변화를 보여주고 있다. 처음에는 e_{rmse} 의 값이 감소하다가 $t_w=305$ 초(2005년), 330초(2011년)에서 최소값을 보인 후에 다시

표 1. 수도권 광역철도망의 변화

교통카드 데이터 날짜	전체 트랜잭션 수	처리된 지하철 트랜잭션 수	지하철역의 수	환승역의 수
2005년	10,667,518	4,909,316	357	53
2011년	13,804,880	7,389,397	467	67
증감 정도 (비율)	3,137,362 (29.41%)	2,480,081 (50.52%)	110 (30.81%)	14 (26.42%)

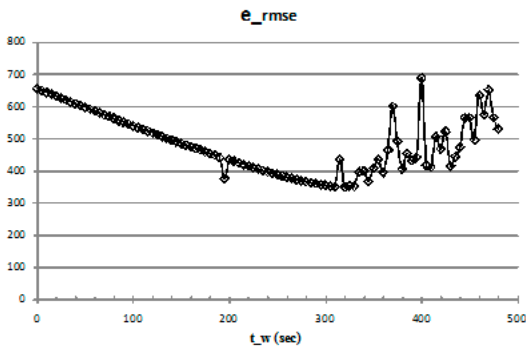


그림 3. t_w 의 값에 따라 변하는 e_{rmse} 의 값

증가하고 있다.

알고리즘 1의 step 4에서 2005년과 2011년 각기 t_w 를 305초와 330초를 두어 각 노선의 전동차의 평균 속도, 각 환승역의 평균 환승 시간, 그리고 모든 역과 역 사이의 시간거리를 구한다. 표 2는 각 노선의 전동차의 평균 속도를 보여주고 있다. 여기서 트랜잭션 수는 알고리즘 1의 step 3.1에서 환승하지 않고 도착역까지 가는 승객들로 각 노선의 전동차의 평균 속도 계산에 참여한 트랜잭션들의 개수에 해당된다. 참여 개수가 많을수록 실제

표 2. 지하철 노선별 평균 속도

지하철노선	2005		2011	
	트랜잭션 수	속도(km/Hr)	트랜잭션 수	속도(km/Hr)
1	3999	34,7749	5830	35,3171
2	1943	35,2337	1995	33,5041
3	1185	34,5598	1421	35,3888
4	1209	35,2153	1419	35,8875
5	1593	31,3954	1601	31,2805
6	706	29,4231	710	28,6361
7	930	34,1562	961	36,0777
8	219	35,244	196	31,4706
9			335	24,7882
인천1호선	427	32,748	692	35,3074
중앙선	9	21,4045	289	35,2263
분당선	183	38,0235	218	37,7457
경춘선			127	47,7402
경의선			291	39,1864
공항철도선			8	42,5930

속도에 가까운 값을 얻을 것으로 추정된다.

표 2에 정리된 것과 같이 지하철의 평균속도는 2005년에는 분당선이 가장 빠른 속도를 보여주고, 6호선이 가장 늦은 것으로 나타난다. 그러나 그 이후 수도권 광역철도망에 경춘선, 경의선, 공항철도선들이 연결되면서 2011년에는 경춘선이

가장 빠르고, 그 뒤를 공항철도, 경의선, 분당선이 잇고 있다. 반면 가장 속도가 느린 노선은 9호선이 고, 그 뒤를 6호선이 따르고 있다.

알고리즘 1의 step 4에서 최적의 t_n 에 따라 환승역의 평균 환승 시간을 계산한 결과 중에서 주요 환승역에 대한 값을 정리하면 표 3과 같다. 수도권

표 3. 환승역의 환승시간 상위 10개역의 연도별 변화

(단위: 초)

구분	환승시간이 빠른 역				구분	환승시간이 긴 역			
	2005		2011			2005		2011	
순서	역이름	환승시간	역이름	환승시간	순서	역이름	환승시간	역이름	환승시간
1	금정	223.25	구로	194.92	1	석계	593.22	망우	852.35
2	공덕	228.44	북정	228.29	2	신설동	572.21	상봉	646.79
3	천호	236.77	천호	239.66	3	대림	555.29	시청	638.29
4	북정	246.58	금정	249.28	4	시청	554.01	신설동	637.82
5	이촌	247.58	공덕	278.81	5	노원	495.93	석계	628.14
6	용산	267.98	청구	291.60	6	충정로	494.71	서울역	613.34
7	회기	271.12	성수	304.27	7	동대문	494.49	회기	584.48
8	까치산	282.70	까치산	318.64	8	강동	490.32	대림	583.68
9	수서	286.70	모란	320.57	9	신당	482.26	온수	582.90
10	모란	309.33	수서	326.29	10	서울역	479.44	옥수	572.01

표 4. 비용거리별 접근도 상위 10개 역의 연도별 변화

구분	경로거리 접근도 A^{hop}			실제거리 접근도 A^{length}			시간거리 접근도 A^{time}	
	2005	2011		2005	2011		2005	2011
순서	역이름	역이름	순서	역이름	역이름	순서	역이름	역이름
1	서빙고	서빙고	1	시청	구반포	1	종로3가	종로3가
2	한남	한남	2	종각	신반포	2	동대문운동장	동대문역사문화공원
3	응봉	응봉	3	종로3가	녹사평	3	을지로3가	시청
4	서울역	시청	4	서울역	시청	4	시청	을지로3가
5	시청	서울역	5	녹사평	효창공원앞	5	충무로	왕십리
6	종각	종각	6	이태원	종각	6	왕십리	충무로
7	종로3가	삼각지	7	버티고개	이태원	7	신당	고속터미널
8	남영	이촌	8	한강진	을지로3가	8	을지로4가	서울역
9	명동	종로3가	9	충무로	서울역	9	약수	삼각지
10	삼각지	신용산	10	효창공원앞	을지로입구	10	서울역	신당

광역 철도망의 환승역들 중 환승시간이 가장 짧은 역은 2005년의 경우 금정역이었으나 2011년에는 구로역으로 바뀌었다. 또한 환승 시간이 가장 긴 역은 2005년의 경우 석계역, 2011년은 망우역으로 나타나고 있다.

수도권 광역철도망의 확충에 따른 각 역들의 접근도 변화를 파악하기 위하여 절에서 제시한 알고리즘 2의 step 1에서 step 4의 과정을 거쳐 세 가지 거리비용을 접근도를 계산하였다. 그림 4는 수도권 광역철도망 상에 있는 역들의 세 가지 접근도 값들 사이의 연관성을 나타낸 것이다.

그림 4에 나타나는 것처럼 수도권 광역철도망 상에 있는 역들의 세 가지 거리비용 접근도는 다소 차이는 있지만 전반적으로는 같은 추세를 보이고 있다. 하지만 시간거리 접근도와 실제거리 접근도의 상관관계가 시간거리 접근도와 경로거리 접근도의 상관관계보다 다소 높게 나타나고 있다. 따라서 수도권 광역철도망에 어떤 비용거리를 적용하느냐에 따라 접근도 값이 높은 최상위 역들의 구성이 차이를 보이며, 또한 2005년과 2011년 사이의 변화 양상도 다르게 나타난다. 표 4는 비용거리별 접근도 상위 10개 역의 연도별 변화를 정리한 것이다. 역과 역 사이의 통과하는 역의 개수를 비용거리로 하는 경로거리 접근도의 경우 최상위 3개역은 2005년과 2011년 모두 서빙고역, 한남

역, 응봉역으로 나타나고, 그 다음 순위를 서울역, 시청역, 종각역이 따르고 있으며 2005년과 2011년 사이에 최상위 역들의 순위에 거의 변화가 없다. 이에 반하여 두 역 간의 실제 선로길이를 적용한 실제거리 접근도의 경우는 2005년에는 시청역, 종각역, 종로3가역이 최상위에 있었으나 2011년에 이르면 구반포역, 신반포역, 녹사평역으로 바뀌게 된다. 한편 시간거리 접근도의 경우 2005년과 2011년 모두 종로3가역이 가장 높으며, 그 뒤를 일부 순위에 변화는 있으나 동대문역사문화공원역, 을지로3가역, 시청역 등이 상위를 차지하고 있다. 이처럼 시간거리 접근도가 높은 역들은 전반적으로 도심 CBD지역에 위치하고 있어 시간거리 접근도가 서울대도시권 공간구조를 설명하기에 적합한 지표임이 입증되고 있다.

3) 수도권 광역철도망 시간거리 접근도의 공간구조 변화

수도권 광역철도망 확충에 따른 서울대도시권 접근성의 공간구조 변화를 시간거리 접근도를 중심으로 분석하기 위하여 GIS를 이용하여 시각화하였다(그림 5 참조).

2005년과 2011년 두 시점의 수도권 광역철도망으로 주어지는 접근성의 변화를 고스란히 파악할 수 있도록 그림 4에서 범례의 범위를 동일하게 적용하였다. 따라서 2005년에 가장 높은 접근도 값을 나타내는 종로3가역의 접근도 값은 차상위 세 번째 범주에 속하는 것으로 2011년 지도에서 이와 같은 접근도 값은 갖게 된 역들은 합정역, 청구역 등이 속한 세 번째 동심원에 위치하는 역들이다. 그림 4에서 수도권 광역철도망으로 주어지는 시간거리접근성은 서울대도시권지역 전반에 걸쳐 크게 개선되었으며, 그 공간적인 분포 양상도 변화를 보이고 있다. 서울시 전역에 걸쳐 시간거리 접근성이 높아졌으며, 그 공간구조가 2005년 단일 중심의 동심원적 구조에서 다핵 구조로 변화되었

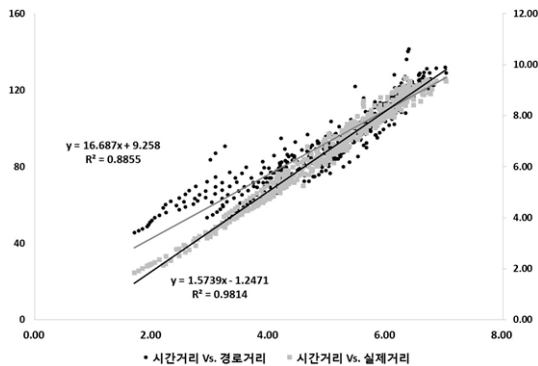


그림 4. 세 가지 거리비용 접근성의 상관관계

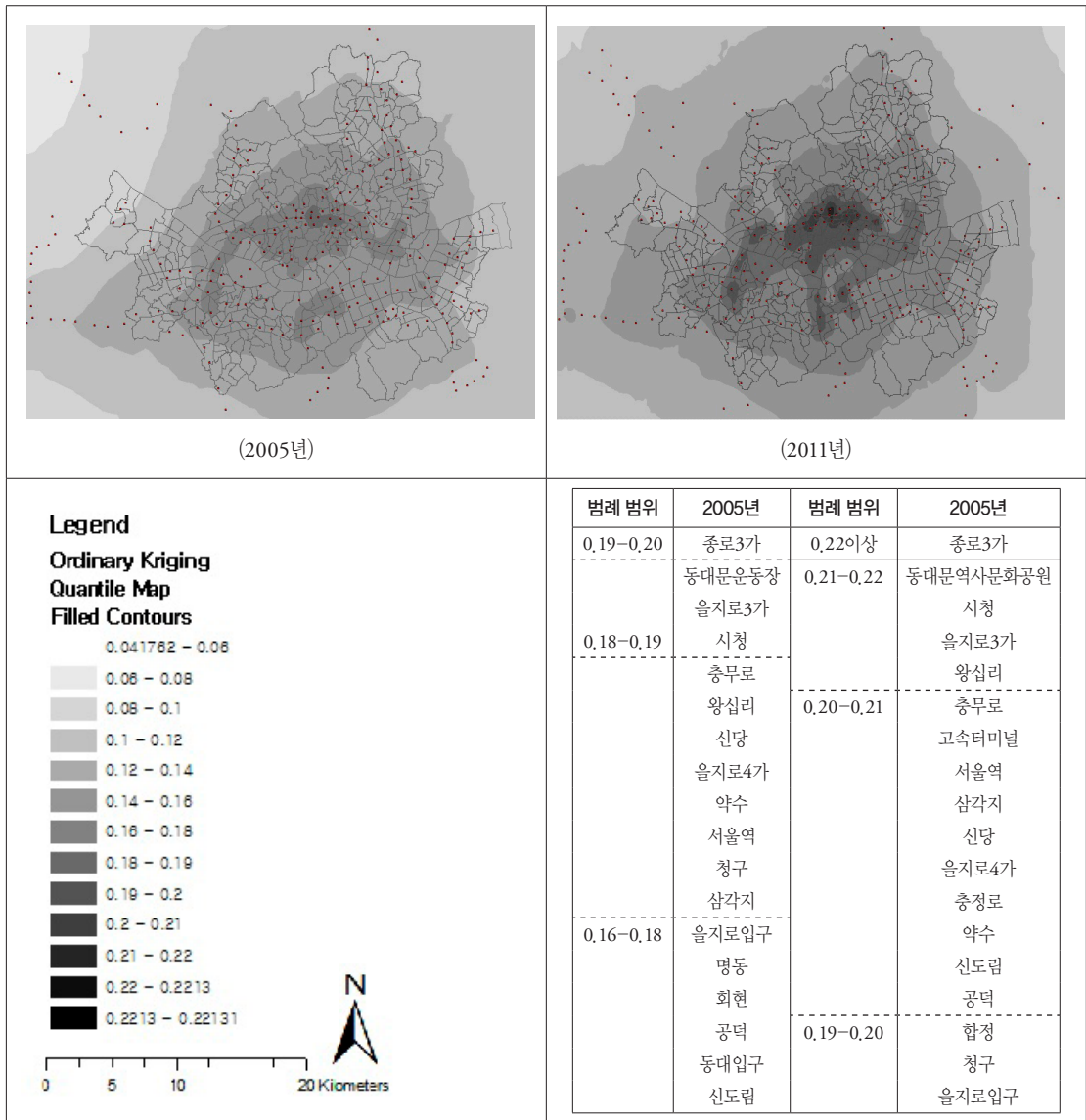


그림 5. 수도권 광역철도망의 시간거리 접근성의 공간구조 변화

다. 특히 서울 도심지역 및 부도심지역들의 시간거리 접근도가 크게 향상되어 시간거리 접근도가 가장 높은 종로3가역의 경우 2005년에 비해 2011년 11.35% 향상되었고, 그 뒤를 잇는 대부분의 도심과 부도심 지역의 시간거리 접근성도는 보다 더 향상되어 25%에 가까운 증가를 보이고 있다. 결과

적으로 2011년 시간거리 접근도에서 15위 이하에 해당되는 합정역과 청구역들이 2005년도 시간거리 접근도가 가장 높았던 종로3가의 접근도 값과 같은 상황이 되었다.

5. 결론

본 논문에서는 2000년대 이후 신분당선, 9호선, 공항철도 등이 신설되고, 경춘선과 중앙선 등 기존 철도노선을 정비 및 전철화 사업으로 수도권 지하철 망에 연결되면서 상당한 변화를 보이고 있는 서울 광역철도체계의 접근도의 변화를 분석하였다. 이를 위하여 수도권 광역철도망과 같이 교통망의 확충을 통해 변화해 나가는 비교정성 교통망에서 이동성을 중심으로 접근도를 산출하고 그 변화 정도를 정확히 정량화하는 합리적인 접근도 산출모형을 제시하였다. 또한 도시민들의 일상 생활 영위를 위한 도시내 통행에 민감하게 작용하는 시간거리를 바탕으로 접근도를 산출하기 위하여 서울 대도시권지역 교통카드 트랜잭션 데이터 베이스에서 도시민의 실제통행기록을 바탕으로 수도권 광역철도망에서 역간 통행에 소요되는 실제 시간거리를 계산하는 알고리즘을 제안하였다. 특히 역간 통행을 위해 환승이 필요한 경우 환승역의 환승시간을 구하는 과정과 산출된 환승 시간 결과를 설명하였다. 이를 2005년과 2011년 수도권광역철도체계에 적용하여 세 가지 거리비용 접근도의 변화를 비교분석 하였다.

수도권 광역철도망에 어떤 비용거리를 적용하느냐에 따라 접근도 값이 높은 최상위 역들의 구성이 차이를 보이며, 또한 2005년과 2011년 사이의 변화 양상도 다르게 나타난다. 수도권 광역철도망 상에 있는 역들의 세 가지 거리비용 접근도는 다소 차이는 있지만 전반적으로는 같은 추세를 보이고 있다. 하지만 시간거리 접근도와 실제거리 접근도의 상관관계가 시간거리 접근도와 경로거리 접근도의 상관관계보다 다소 높게 나타나고 있다. 시간거리 접근도가 높은 역들은 전반적으로 도심 CBD 지역에 위치한 역들로 서울대도시권의 토지이용패턴을 잘 반영하고 있으므로 시간걸 접근도가 수도권 지역의 공간구조를 설명하기에 적

합한 지표임을 입증하고 있다. 수도권 광역철도망으로 주어지는 시간거리접근성은 서울대도시권지역 전반에 걸쳐 크게 개선되었으며, 그 공간적인 분포 양상도 변화를 보이고 있다. 특히 서울시 전역에 걸쳐 시간거리 접근성이 높아졌으며, 그 공간구조가 2005년 단일 중심의 동심원적 구조에서 다핵 구조로 변화되었다.

이러한 연구의 결과는 추후 서울 수도권지역의 토지이용패턴의 변화 방향을 예측하는 기초자료가 되며, 이 외에도 교통과 토지계획, 경제활동의 입지문제, 주택시장 분석은 물론, 향후 국내외의 다른 도시들의 교통과 토지이용 입지계획을 수립하는데도 활용할 수 있는 매우 중요한 자료로 이용될 수 있을 것이다.

주

- 1) 환승역의 경우 노선에 따라 각기 다른 역 번호가 부여되어 있지만 본 연구에서는 통합하여 하나의 역으로 간주하였다.

참고문헌

- 김소연·이금숙, 2006, “시간거리 접근성 카토그램제작 및 접근성 공간구조 분석,” 한국경제지리학회지 9(2), pp.149-166.
- 이금숙, 1996, “지역 접근성 측정을 위한 일반모형,” 응용지리 18, pp.25-55.
- 이금숙·김경민·송예나, 2010, “복합용도개발과 교통이 아파트가격에 미치는 영향,” 한국경제지리학회지 13(4), pp.515-528.
- 이금숙·홍지연·민희화·박종수, 2007, “수도권 지하철망 상 통행흐름의 위상학적 구조와 토지이용의 관계,” 한국경제지리학회지 10(4), pp.427-443.
- Allen, W. B., D. Liu, and Singer, S., 1993, “Accessibility Measures of U.S. Metropolitan Areas,” *Transportation Research Record* 124, pp.1-10.

- tation Research B* 27, pp.49-49.
- Bach, L., 1980, "Locational Models for Systems of Private and Public Facilities Based on Concepts of Accessibility and Access Opportunity," *Environment and Planning A* 12, pp.301-320.
- Bach, L., 1981, "The Problem of Aggregation and Distance for Analyses of Accessibility and Access Opportunity in Location-Allocation Models," *Environment and Planning A* 13, pp.955-978.
- Baxter, R. S., and Lend, G., 1975, "The Measurement of Relative Accessibility," *Regional Studies* 9, pp.15-26.
- Black, J., and Conroy, M., 1977, "Accessibility Measures and the Social Evaluation of Urban Structure," *Environment and Planning A* 9, pp.1013-1031.
- Dalvi, M. Q., and Martin, K. M., 1976, "The Measurement of Accessibility: Some Preliminary Results," *Transportation* 5, pp.17-42.
- Davidson, K. B., 1977, "Accessibility in Transport/Land-use Modelling and Assessment," *Environment and Planning A* 9, pp.1401-1416.
- Giuliano, G., 2004, "Land use impacts of transportation Investments: highway and transit," (Edrs) Hansen, S. and Giuliano, G., *The Geography of Urban Transportation* (3rd Edition), The Guilford Press: New York London, pp.237-273.
- 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., 1993, "Regional versus Local Accessibility: Implications for Nonwork Travel," *Transportation Research Record* 1400, pp.58-66.
- Handy, S. L., and 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 the American Institute of Planners* 25(2), pp.73-76.
- Ingram D. R., 1971, "The concept of accessibility: A search for an operational form," *Regional Studies* 5, pp.101-107.
- Jones, S. R., 1981, "Accessibility Measures: A Literature Review," TRRL LR 967 Monograph: Wokingham, U. K.
- Kirby, H. R., 1976, "Accessibility Indices for Abstract Road Networks," *Regional Studies* 10, pp.479-482.
- Koenig, J. G., 1980, "Indicators of Urban Accessibility: Theory and Application," *Transportation* 9, pp.145-172.
- Kwan, Mei-Po and Weber, J., 2008, "Scale and accessibility: Implications for the analysis of land use-travel interaction," *Applied Geography* 28(2), pp.110-123.
- Lakshmanan, T. R., and Hansen, W. G., 1965, "A Retail Market Potential Model," *Journal of the American Institute of Planners* 31, pp.13-43.
- Lee, K. and Lee, H. Y., 1998, "A new algorithm for graph-theoretic nodal accessibility measurement," *Geographical Analysis* 30(1), pp.1-14.
- Lee, K., Song, Y. Park, J. S. and Anderson, W. P., 2012, "Relationship between Diurnal Patterns of Transit Ridership and Land Use in the Metropolitan Seoul Area," *한국경제지리학회지* 15(1), pp.26-41.
- Moms, J. M., Dumhile, P. L. and Wigan, M. R., 1979, "Accessibility Indicators for Transport Planning," *Transportation Research A* 13, pp.91-109.
- Pine, G. H., 1979, "Measuring Accessibility: A Review and Proposal," *Environment and Planning A* 11, pp.299-312.
- Reggiani, A., 1998, "Accessibility, Trade and Location Behaviour: An Introduction", in A. Reggiani(ed.), *Accessibility, Trade and Location Behaviour*, Ashgate, pp.1-14.
- Richardson, A. J., and Young, W., 1982, "A Measure of Linked-Trip Accessibility," *Transportation Planning and Technology* 7, pp.73-82.
- Rushton, G., 1984, "Use of Location-Allocation Models for Improving Geographical Accessibility of Rural Services in Developing Countries," *International*

- Regional Science Review* 9, pp.217-240.
- Sedgewick, R., 2002, *Algorithms in C++*, Third Ed., Addison-Wesley.
- Shen, Q., 1998, "Location characteristics of inner city neighborhoods and employment accessibility of low-wage workers," *Environment and Planning B, Planning and Design* 25, pp.345-365.
- Sherman, L., Barber, B. and Kondo, W., 1974, "Method for Evaluating Metropolitan Accessibility," *Transportation Research Record* 499, pp.70-82.
- Shimbel, A., 1953, "Structural Parameters of Communication Networks," *Bulletin of Mathematical Biophysics* 15, pp.501-507.
- Song, S., 1996, "Some Tests of Alternative Accessibility Measures: A Population Density Approach," *Land Economics* 72(4), pp.474-482.
- Song, Y., Lee, K., Anderson, W. P. and Lakshmanan, T. R., 2012, "Industrial agglomeration and transport accessibility in metropolitan Seoul," *Journal of Geographical Systems* 14(3), pp.299-318.
- Stanilov, K., 2003, "Accessibility and Land Use: The Case of Suburban Seattle, 1960-1990," *Regional Studies* 37(8), pp.783-794.
- Stegman, M. A., 1969, "Accessibility Models and Residential Location," *Journal of the American Institute of Planners* 35, pp.22-29.
- Taaffe, E. J., Gauthier, H. L. and OKelly, M. E., 1996, *Geography of Transportation*, Upper Saddle River, N.J.: Prentice-Hall.
- Wachs, M., and Kumagai, T. G., 1973, "Physical Accessibility as a Social Indicator," *Socioeconomic Planning Science* 7, pp.437-456.
- 교신: 이금숙, 136-742, 서울특별시 성북구 동선동 3가 249-1, 성신여자대학교 지리학과, 전화: 02-920-7138, 이메일: kslee@sungshin.ac.kr
- Correspondence: Keumsook Lee, 249-1 Dongseon-dong 3-ga, Seongbuk-gu, Seoul 136-742, Korea, Tel: 82-2-920-7138, e-mail: kslee@sungshin.ac.kr

최초투고일 2014년 2월 5일
수정일 2014년 2월 24일
최종접수일 2014년 2월 29일