

시간거리 접근성과 교통카드 기반 통행량을 이용한 OD별 잠재적 대중교통 서비스 개선량 분석*

양현재¹ · 남현우¹ · 전철민^{1*}

Analysing Potential Improvement of Public Transit Services in OD Level Using Time-Distance Accessibility and Smartcard Traffic Volume*

Hyun-Jae YANG¹ · Hyun-Woo NAM¹ · Chul-Min JUN^{1*}

요 약

대중교통 서비스 개선 분석은 형평성의 관점에서 공급과 수요의 상관관계로 분석되고 있다. 공급은 접근성을 이용하여 계산하고 있으며, 수요는 거주인구를 기반으로 추정된 통행수요가 이용되고 있다. 그러나 추정에 의한 수요는 교통카드 기반 통행량에 비하여 정확성과 미시적인 공간 단위의 개선지역을 도출하기 어려운 한계가 있다. 이에 본 연구는 교통카드 데이터 기반의 통행량을 이용하여 대중교통의 잠재적인 서비스 개선량을 산출하였다. 대중교통의 공급은 시간거리 접근성으로 계산하였고, 이를 통해 상대적으로 접근성이 떨어지는 출·도착지 쌍(OD)을 이용하는 승객이 손해 보는 시간비용을 계산하였다. 서울시를 대상으로 본 연구에서 제안한 방법론을 적용하여 모든 OD의 시간비용을 계산하였으며, 분석 결과 서대문구, 구로구, 노원구 등지에서 개선이 가능한 것을 확인하였다.

주요어 : 대중교통 서비스 잠재적 개선량, 시간거리 접근성, 교통카드 데이터, OD 분석

ABSTRACT

Public transit services are generally analyzed based on the correlation of demand and supply. The computation of supply uses accessibility while demand uses travel demands estimation based on residential population. However, the traditional demand estimation has a limitation in analysing in micro-scale compared to the smartcard data traffic. This study

2018년 5월 9일 접수 Received on May 9, 2018 / 2018년 6월 19일 수정 Revised on June 19, 2018 /
2018년 6월 20일 심사완료 Accepted on June 20, 2018

* 본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구개발사업의 연구비지원(18CTAP-C133228-02)에 의해 수행되었습니다.

¹ 서울시립대학교 공간정보공학과 Dept. of Geoinformatics, University of Seoul

* Corresponding Author E-mail : cmjun@uos.ac.kr

analyzed potential improvement of public transit services using smartcard traffic data. The supply of transportation was defined using time distance accessibility. Also, time loss was calculated in those origin destination(OD) pairs where time distance accessibilities are relatively low. The proposed method was applied at Seoul. The results showed that the areas where OD pairs need improvement include Seodaemun-gu, Guro-gu and Nowon-gu.

KEYWORDS : *potential public transit service improvement, time distance accessibility, smartcard data, OD analysis*

서 론

대중교통은 이용가능한 최소한의 이동수단으로서 공공재적인 성격이 크다. 도시가 커짐에 따라 시민의 목적지까지 이동거리가 증가하게 되었다. 특히, 국내에서는 시민들이 통근통행을 비롯한 일반적인 통행을 목적으로 대중교통을 이용하는 특성을 보인다. 국내의 통행 특성으로 인하여 대중교통은 일반적인 시민의 삶의 질에도 많은 영향을 준다. 이에 대중교통이 시민들에게 균형적으로 서비스되는지에 관한 연구들이 이루어졌다.

대중교통 서비스가 형평성 있게 제공되는 지는 공급과 수요를 비교하여 연구되어 왔다. 이러한 연구들은 수요와 공급의 상관관계나 로렌츠 곡선(lorenze curve)을 통해 서비스 불균형 지역을 분석하였다(Yun *et al.*, 2015; Bok *et al.*, 2016; Farber *et al.*, 2017). 대중교통이 공급되는 정도는 지역의 정류장 수나 노선의 개수, 다른 지역으로의 이동시간이나 이동가능성 등으로 정의하였다. 수요로는 지역의 거주인구나 등록차량 대수, 지가 등으로 추정된 잠재적 수요를 이용하였다. 선행연구들은 공급과 수요의 상관관계로 연구지역에 형평성의 정도를 정량화하고, 수요가 높고 공급이 낮은 서비스 하위 지역들을 개선 필요지역으로 분석하였다.

그러나 잠재적인 수요는 교통카드 기반 통행량과 비교하여 정확성과 공간적 단위의 한계를 보인다. 잠재적인 수요는 해당 지역의 거주인구와 다른 지역의 직장, 학교 등의 통행유발요인을 통해 추정되며, 실제로 발생한 수요를 파악

하기 어렵다. 또한, 잠재적 수요는 사용된 데이터의 공간적 단위보다 작은 단위로의 추정이 불가능하다. 수요 추정에 이용되는 거주인구나 시설물의 통계 데이터는 행정구역 단위로 집계되어, 이보다 작은 단위의 통행 수요를 추정하기 어렵기 때문이다. 반면, 교통카드 수요는 실제로 발생한 통행이 정류장 단위로 집계되어 보다 미시적인 공간 단위에서의 분석이 가능한 장점이 있다.

이에 본 연구는 교통카드 수요를 활용하여 정류장 단위 OD(origin-destination)의 서비스 개선량을 분석하였다. 정류장 단위의 OD를 분석함으로써 기존의 연구방법으로서 확인할 수 없었던 미시적인 단위에서의 공급과 수요를 정량적으로 비교하고자 한다. 미시적인 OD 별 대중교통 서비스 개선량을 산출하기 위해서, 교통카드 수요와 이동시간 기반의 접근성을 활용하였다. 모든 OD별로 시간거리 접근성을 산출하고, 유사한 거리의 평균 접근성과의 차이를 해당 OD의 공급 차이로 가정하여 시간 단위의 손해량을 계산하였다. 그리고 통행량을 이용하여 상대적 접근성이 낮은 OD를 이용하는 승객들이 손해보는 총 시간을 계산하고, 서비스 개선이 가능한 정도로서 서비스 개선량으로 정의하였다.

선행연구

1. 대중교통 접근성

대중교통의 공급은 ‘목적지까지 이동하기 편리한 정도’의 개념인 접근성(accessibility)으로 정의되고 있다. 접근성은 포괄적인 개념으로 인하여 연구자마다 다양하게 정의되고 있다.

TABLE 1. Studies on accessibility using travel time

Researchers	Define travel times	Analysis units	Descriptions
Park(2017), Kujala(2018)	$T_{vehicle} + T_{wait} + T_{walk}$	station OD	public transit network service distribution analysis
Sun(2015)	$T_{vehicle} + T_{wait}$ $+ T_{walk} + T_{penalty}$		public transit network changes effect analysis
Choi(2016)			public transit network service analysis using population weighted accessibility
Farber(2016)	$T_{vehicle} + T_{wait} + T_{walk}$	TAZ(traffic analysis zone),	correlation analysis between accessibility and each type of population
Han(2016)	$T_{vehicle} + T_{walk}$	administrative area	public transit service improvement area analysis using comparison between accessibility and population

Lei *et al.*, (2010)은 접근성을 크게 세 가지 유형으로 구분하였다. 첫 번째 정의는 ‘대중교통 시설까지 접근하기 쉬운 정도’ 이다. 이와 같은 관점으로 Yun *et al.*, (2015)이 접근성을 지역 내 시가지 구역과 대중교통 서비스 지역의 면적 비로 정의하였고, Bok *et al.*, (2016)은 대중교통의 정류장에서 이동가능한 권역과 차두시간을 이용하여 접근성을 정의하였다. 두 번째 정의는 ‘목적지까지 이동하기 용이한 정도’ 이다(Choi, 2016; Farber *et al.*, 2016; Park *et al.*, 2017; Kujala *et al.*, 2018). 세 번째 정의는 ‘목적지까지 이동할 수 있는 서비스 기회의 정도’ 로 정의된다. 이러한 관점으로 Cascetta *et al.*, (2013)과 Kim(2015)은 목적지에서 이용가능한 서비스의 종류와 출발지에서 목적지까지의 경로의 수를 이용해 접근성을 정의한다.

최근 두 번째 관점에서 대중교통을 이용하여 목적지까지 도달하는 데 걸리는 시간을 기반으로 접근성을 정의한 연구들이 다수 진행되었다. 표 1은 이동시간을 기반으로 접근성을 정의한 선행연구로 승객의 이동시간을 다양하게 정의하고 있다. 선행연구들은 차내시간과 도보이동시간만 고려하거나(Han, 2016), 차량대기시간도 계산하는 경우(Farber *et al.*, 2016; Park *et al.*, 2017; Kujala *et al.*, 2018), 환승에 따른 승객의 심리적 페널티까지 고려하는 경우(Sun *et al.*, 2015; Choi, 2016)로 차이가 나타났다. 또한, 환승시간을 계산하는 방법에서도 차두시간의 평균으로 산출(Choi, 2016; Park *et al.*, 2017)하거나 실제 대기시간을 계산하는 차이를

보였다.

이동시간은 대중교통 서비스의 평가에 중요하게 활용되고 있다. Noh *et al.*, (2005)은 출발지에서 목적지 사이의 이동시간을 기반으로 한 대중교통 서비스 평가가 이루어지지 않음을 지적하며, 행정동 간의 대중교통 이동시간과 차량이동시간의 차이를 이용한 지표를 제시하였다. Lei *et al.*, (2010)은 대중교통 서비스에서 이동시간의 중요성을 설명하며 이동시간 기반의 접근성 지표를 제시하였다. 이처럼 이동시간이 승객이 체감하는 대중교통 서비스로 연구되고 있다. 또한, 대중교통 접근성의 정의로 다른 두 유형은 미시적인 OD 단위로 산출하기에 한계가 존재하였다. 이에 본 연구에서는 목적지까지의 이동시간이 미시적인 단위에서 승객에게 제공되는 대중교통 서비스를 대표할 수 있으리라 판단하였다.

2. 대중교통 수요

대중교통 통행 수요를 취득하기 위하여 과거에는 인구통계조사에서 설문을 통한 수요 추정을 이용하였다. 최근에는 휴대폰 통화량이나 차량 GPS 데이터, 교통카드 데이터들을 활용하여 통행량을 집계하거나 추정하는 방법이 연구되고 있다(Munizaga *et al.*, 2012). 특히, 국내에서는 교통카드 데이터에 승하차 정류장이 기록되고 전수에 가까운 통행이 기록되고 있어 정류장 단위의 대중교통 통행량을 집계할 수 있다. 이에 교통카드 도입 이후로 결측 데이터를 보정하여 정확한 통행량을 집계하는 연구(Park *et al.*,

2008)와 함께, 교통카드 데이터를 이용하여 잠재적인 수요를 추정하는 연구들도 시도되고 있다(Woo, 2014; Baek, 2016).

교통카드 데이터를 기반으로 잠재적 수요를 추정하는 연구들은 통행유발요인으로 통행을 추정하거나 딥러닝 기법(deep learning method)을 이용하고 있다. Woo(2014)는 교통카드 데이터와 건축물 단위의 인구, 출퇴근 통행 OD등의 공공데이터를 이용하여 작은 블록(block) 단위의 OD 수요를 추정하였다. 다만, Woo(2014)는 건축물 단위에 따라 수요추정의 정확성이 차이나는 한계가 존재한다. Baek(2016)은 딥러닝 기법을 적용하여 교통카드 데이터와 정류장 주변 시설물 데이터를 이용하여 정류장 단위의 버스 수요를 추정하였다. 그러나 Baek(2016)은 딥러닝에 이용한 데이터의 수가 적으면 과적합되는 문제가 발생하여, 추정의 정확도를 향상시키는데 한계가 존재하였다.

이처럼 교통카드 데이터를 이용한 수요추정은 공간적 단위가 미시적일수록 정확성이 떨어지는 한계를 가진다. 행정동 단위의 수요추정은 기존의 설문을 통한 수요추정보다 정확성이 높으나 공간적 단위가 거시적인 한계를 가진다. 미시적인 단위의 OD 수요 추정은 아직 방법론을 제시하고 검증하는 단계로 분석에 활용하기에는 정확성이 낮다. 또한, 미시적인 공간 단위의 수요 추정은 건축물 단위의 인구, 통화량, 건물의 종류와 같이 다양한 통행유발요인들을 고려하고 있으나, 본 연구에서 해당 데이터들을 취득하기에는 한계가 존재하였다.

반면, 교통카드 데이터를 실제로 발생한 통행으로 활용하면 실제 승객의 수요를 명확히 반영할 수 있다. 교통카드 기반 통행량은 잠재적 수요와 달리 실질적으로 이루어지고 있는 통행으로서 해당 구간의 서비스가 부족하다면 실제 승객들이 불균형한 서비스를 이용하고 있음을 의미한다. 실제 통행량은 시점에 따른 경향이 과중하게 반영될 수 있는 한계가 존재하나, 본 연구는 실제 수요로의 가치가 더 높다고 판단하고 통행량으로서 활용하였다.

3. 대중교통 개선 지역 분석에 관한 연구

대중교통 개선 지역을 도출하는 연구들은 형평성의 관점에서 수요와 공급을 비교하였다. 형평성은 다양한 계층에게 자원이 적절히 분배되고 있는 가를 의미한다. 형평성의 관점에서는 대중교통의 수요와 공급을 비교하여 상관관계를 분석하고, 대중교통의 개선이 필요한 취약지나 사회적 약자가 배제되는 지역을 도출한다. 대중교통 형평성 분석에는 공급으로 접근성 지표가 활용되며, 수요로는 인구, 소득, 계층과 같은 수치를 이용하여 상관성을 분석하여 형평성 지수를 분석하였다(Currie *et al.*, 2010; Lee *et al.*, 2012; Farber *et al.*, 2016; Han 2016). Farber *et al.*, (2016)은 접근성과 다양한 인구의 속성의 상관관계를 확인하였다. Currie *et al.*, (2010)과 Lee *et al.*, (2012)은 접근성을 인구통계자료를 활용한 지표와 상관성을 확인하고 서비스가 낮고 인구가 많은 불균형 지역을 찾았다. Han(2016)은 로렌츠 곡선을 이용하여 형평성 지수를 정의하였으며, 인구 계층에 따라 사회적 배제가 발생하는 지역을 분석하였다.

그러나 대중교통 개선 지역을 도출한 연구들은 교통카드 데이터와 같은 실제 수요를 반영하지 못하고 있다. 대중교통 정책은 잠재적인 수요도 반영해야하지만, 실제로 발생하고 있는 수요도 고려하여야 한다. 또한, 개선 지역을 도출한 기존의 연구는 행정구역 단위로 형평성을 분석하여 보다 미시적인 공간 단위로의 문제를 파악할 수 없다. 대중교통의 개선이 필요한 행정구역을 도출하는 것은 거시적인 시점에서 교통계획을 세울 때 적합하다. 하지만 노선의 정류장을 수정하거나 배차간격을 조절하는 등의 미시적인 조정에는 효과적이지 않다. 이에 본 연구는 시간거리 접근성과 교통카드 데이터를 이용함으로써 실제 통행수요를 반영한 미시적인 공간단위의 분석을 시도하였다.

방법론

본 연구에서 각 OD별 개선량을 도출하기 위

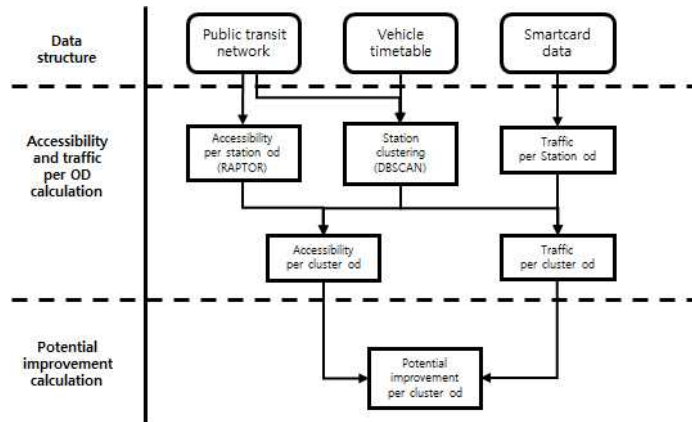


FIGURE 1. The flow of the method

한 방법은 그림 1과 같이 데이터 구축, OD별 지표 산출, 개선량 도출로 구성된다. 데이터 구축과정에서는 대중교통 네트워크의 구축과 차량 운행정보, 교통카드 데이터를 구축한다. OD별 공급과 수요를 계산하기 위하여 군집화와 이동시간의 계산, 통행사슬 구축과 같은 과정을 수행한다. 최종적으로 산출된 지표들을 집계하여 각 OD별 잠재적 대중교통 서비스 개선량을 도출하고, 개선량이 높은 OD들의 개선가능여부를 경험적으로 분석하였다.

1. 시간거리 접근성

본 연구에서는 출발지에서 목적지까지 걸리는 이동시간을 이용하여 시간거리 기반의 접근성을 정의하였다. 이동시간을 이용한 접근성의 정의는 식 1과 같다. 수식 1의 각 파라미터는 그림 1과 표 2와 같다. 그림 2는 최초출발지(P_0)에서 최종목적지(P_D)까지의 이동과정의 예시이다.

$$T_{vehicle} + T_{wait} + T_{walk} + T_{penalty} \quad (1)$$

대중교통 이동시간은 RAPTOR(Delling *et al.*, 2012)를 이용하여 계산하였다. 최근, 대중교통 시간표를 이용한 최단 이동시간 경로를 찾는 알고리즘이 제시되어, 기존의 그래프 이론 기반의 알고리즘보다 빠른 연산시간을 보여주었다. RAPTOR는 최단 이동시간을 산출하는 알고리즘 중에 하나이다. 이를 사용하기 위해 대중교통 네트워크와 대중교통 환승 네트워크, 대중교통 운행 정보를 구축하였다. 구축한 데이터와 RAPTOR를 이용하여 모든 정류장에서 정류장까지의 최단 이동시간을 산출하였다.

그러나 모든 정류장 OD는 승객이 실제로는 고려하지 않을 경로까지 포함한다. 승객은 출발 지역에서 인접한 여러 정류장 중에서 이용할 수 있는 가장 합리적인 경로를 선택한다. 목적지까

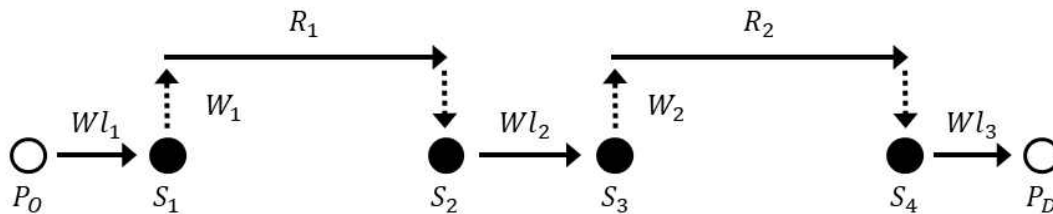


FIGURE 2. An example of a journey using public transit

TABLE 2. The notations of formula (1)

Elements	Defines	Descriptions
$T_{vehicle}$	$\sum_{i \in N} R_i$	time when boarding vehicle
T_{wait}	$\sum_{i \in N} W_i$	waiting time before boarding other vehicle
T_{walk}	$\sum_{j \in K} W_j$	walking time to other station
$T_{penalty}$	$(N-1) \times P$	penalty when passenger transfer other route calculate by marginal rate of substitution
N		all trips between first origin and last destination
K		all walking link between first origin and last destination
R_i		travel time when trip i
W_i		waiting time for trip i
W_j		walking time when walk j
P	5.25 (minutes)	transfer marginal rate of substitution

지 대중교통의 이용을 고려할 경우, 출발지에서 도보로 이동가능하리라 판단되는 권역 내의 정류장에서 목적지까지 가장 편리하게 이동할 수 있는 경로를 선택한다. 따라서 사용하지 않을 경로들을 제외하기 위해 인접한 정류장들을 군집화하는 과정을 수행하였다. 군집화는 Lee *et al.*, (2017)의 연구를 참고하여 수정한 DBSCAN (density-based spatial clustering of applications with noise)으로 수행하였다.

최종적으로 정류장 OD의 접근성을 활용하여 군집 OD의 접근성을 집계하였다. 군집에서 군집까지의 접근성을 출발 군집내의 정류장과 도착 군집내의 정류장으로 이동할 수 있는 정류장 OD들을 비교하였다. 또한, 군집의 중심지를 군집의 최초출발지와 최종도착지라 가정하여 군집의 중심에서 정류장으로 이동하는 시간을 계산하였다.

2. 교통카드 데이터를 이용한 통행량

교통카드 데이터는 승객이 교통카드를 태깅 (tagging)하면서 발생하는 일련의 정보를 모은 데이터이다. 교통카드 데이터의 열(row)에는 승객의 승차태깅과 하차태깅을 기준으로 데이터가 기록된다. 이는 하나의 교통수단을 이용한 통행으로 승객의 최초출발지와 최종목적지를 의미하지 못한다. 최초출발지와 최종목적지로의 통행량을 집계하기 위해, 교통카드 데이터에서 통행

사슬을 추정하는 과정을 수행하였다.

통행사슬(trip chain)은 최초출발지에서 최종목적지까지의 일련의 통행집합을 의미한다. 교통카드 데이터에서 통행사슬을 구축하기 위해 각 열의 카드 ID와 승하차 시간을 이용하였다. 통행사슬에 속한 집합인지 구분하기 위하여, 동일한 카드 ID이며 이전 통행의 하차시간보다 승차시간이 30분 이내인 열들을 찾아 동일한 통행사슬으로 구분하였다. 또한, 이 과정에서 승하차 태깅이 되지 않은 결측 데이터는 제거하였다. 최종적으로 구축한 통행사슬을 이용하여 모든 정류장 OD의 통행량을 추정하였다. 그리고 추정한 정류장 OD 통행량을 앞서 구축한 군집 단위로 집계하여 군집 OD 통행량을 집계하였다.

3. 서비스 개선 분석

본 연구는 이동시간 기반의 접근성과 교통카드 데이터를 이용한 수요로 서비스 개선 지역을 도출하고자 한다. 이를 위해 각 군집 OD 접근성을 비교하여 서비스의 수준을 비교하였다. 일반적으로 먼 거리를 이동하는 경우에 이동시간이 더 오래걸린다. 이에 따라 군집 OD 접근성은 지리적으로 멀리 떨어진 군집 OD가 더 낮게 나타난다. 지리적인 특성이 군집 OD 접근성에 영향을 주기에 유사한 거리의 OD 간에 접근성을 비교하여 상대적으로 서비스가 낙후된 OD의 접근성 차이를 계산하였다.

각 군집 OD의 거리는 도로 네트워크를 이용하여 최단거리로 계산하였다. 도시는 강이나 하천, 건물, 산과 같은 지형지물로 인하여 통행이 불가능한 지역이 존재한다. 또한, 버스는 도로망을 따라 구축되기에 단순히 직선거리를 이용하는 것은 많은 오차를 야기한다. 이에 도로 네트워크를 구축하고 각 군집의 중심에서 다른 군집의 중심까지 최단 거리를 계산하였다.

군집 OD의 접근성과 거리를 이용하여 유사한 거리에 있는 군집 OD들의 접근성의 평균을 산출하였다. 거리별 평균 군집 OD 접근성은 식 2와 표 3과 같이 정의하였다. 식 2는 1km 단위마다 네트워크의 평균 이동시간을 의미한다. 단순 이동시간 기반의 접근성이 거리에 많은 영향을 받아 공급의 비교로서 적절치 않다. 이에 공급으로서 비교하기 위하여 상대적 접근성을 계산하였다. OD별 상대적 접근성은 거리별 평균 접근성과의 차이로 산출하였다. 이를 통해 본 연구에서는 유사한 거리를 가지는 OD들을 이동할 때의 평균과 차이를 해당 OD를 이용하는 승객이 손해보는 시간으로 정의하였다. 또한, 이를 잠재적으로 개선이 가능한 시간비용이라고 가정하였다. 식 3과 같이 해당 OD를 이용하는 승객의 수를 이용하여 OD를 이용하는 승객들이 손해보는 총 시간비용을 잠재적 개선량으로 산출하였다.

TABLE 3. The notations of formula (2) and (3)

Elements	Descriptions
\bar{V}_l	velocity of all OD pairs length is l
g_i	expected improvement of OD i
O_l	group of all OD pairs ($\square d_i \square = l$)
l	integer length
d_i	distance of OD i
t_i	accessibility of OD i
f_i	passengers count of OD i

$$\bar{V}_l = \frac{1}{n(O_l)} \times \sum_{i \in O_l} \frac{d_i}{t_i} \quad (2)$$

$$g_i = f_i \times (t_i - \frac{d_i}{\bar{V}_l}) \quad (3)$$

최종적으로 각 군집 OD의 접근성 차이를 계산하고 이에 교통량을 가중하여 서비스 개선이 우선되어야하는 지역을 도출하였다. OD의 일일 통행량은 OD의 개선 시 영향을 받는 인원로 판단할 수 있다. 이에 앞서 계산한 OD의 개선 가능한 정도와 통행량을 식 3을 통해 계산하여 man-minute 단위의 잠재적 개선량을 도출할 수 있다. 본 연구에서는 개선량이 높을수록 개선의 우선순위가 높은 지역으로 가정하고 이를 기준으로 서비스 개선 우선지역을 도출하였다.

실험 결과

1. 데이터 구축

본 연구는 서울시를 연구지역으로 분석을 수행하였으며, 대중교통 네트워크와 환승 네트워크, 도로 네트워크, 대중교통 운행정보, 교통카드 데이터를 구축하였다. 대중교통 네트워크와 대중교통 운행정보, 교통카드 데이터는 서울시 TOPIS에서 제공받은 데이터를 기반으로 구축하였다. 도로 네트워크는 ITS표준노드링크를 이용하였으며, 환승 네트워크는 대중교통 네트워크를 가공하여 구축하였다. 대중교통 네트워크는 그림 3과 같으며, 지하철 20개 노선과 버스 473개 노선으로 구축되었다. 버스 노선은 서울시에서 운영하는 광역, 간선, 지선 버스로 이루어져있으며 운행정보가 부정확한 노선을 제거하였다. 버스와 지하철 정류장은 13,189개이며, 이를 최소정류장 개수 3개, 최소 거리 150m, 최대 거리 240m의 파라미터로 군집화하였다. 그 결과 군집 내 정류장 간 거리가 150m이고 군집내 정류장의 개수가 평균 5개인 군집을 형성하였다. 연구지역을 서울시로 한정하기 위해 군집 중에 서울시 내부에 위치한 군집만 취합하여 그림 4처럼 군집 2,481개를 추출하였다.

교통카드 데이터는 2017년 10월 12일에서 17일까지 6일간의 데이터를 이용하였다. 제공받

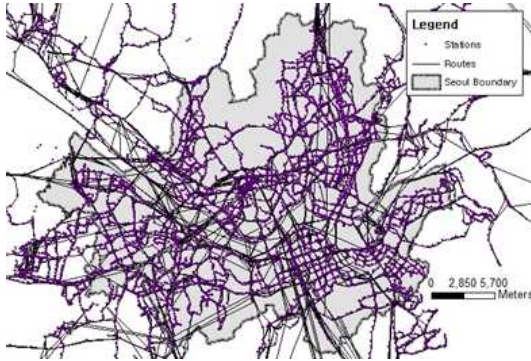


FIGURE 3. Seoul metropolitan public transit network

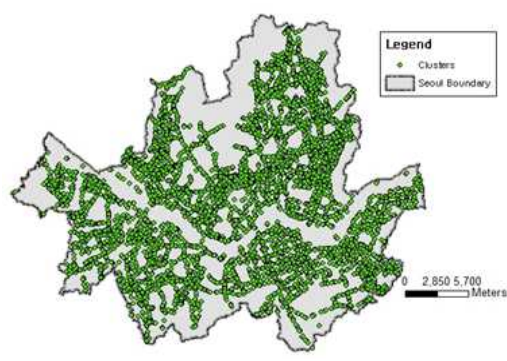


FIGURE 4. Clusters of station in Seoul city

은 데이터는 총 7,868만 건이며, 이를 이용하여 통행사슬로 변환한 결과 5,366만 건의 통행을 구축하였다.

2. 접근성 산출 결과

구축된 데이터와 RAPTOR를 이용하여 모든 정류장 OD의 접근성을 계산하고, 이를 군집 OD의 접근성으로 집계하였다. RAPTOR는 대중교통 시간표 기반의 최단 시간 산출알고리즘으로 출발시간에 따라 최단시간이 다르게 산출

될 수 있다. 본 연구에서는 오전 침두시 중 8시를 기준으로 접근성을 산출하였다. 모든 정류장 OD의 접근성은 총 173,949,721개이며 이를 계산하는 데 약 4시간이 소요되었다(Xeon E5-2667 v3 3.20GHz, 64GiB RAM). 이를 6,155,361개의 군집 OD로 집계하여 접근성을 산출하였다. 또한, 모든 군집 OD의 도로 네트워크 최단 거리를 산출하였다.

출발 군집에서 다른 모든 군집까지의 접근성으로 출발 군집에서 다른 지역까지의 서비스 수

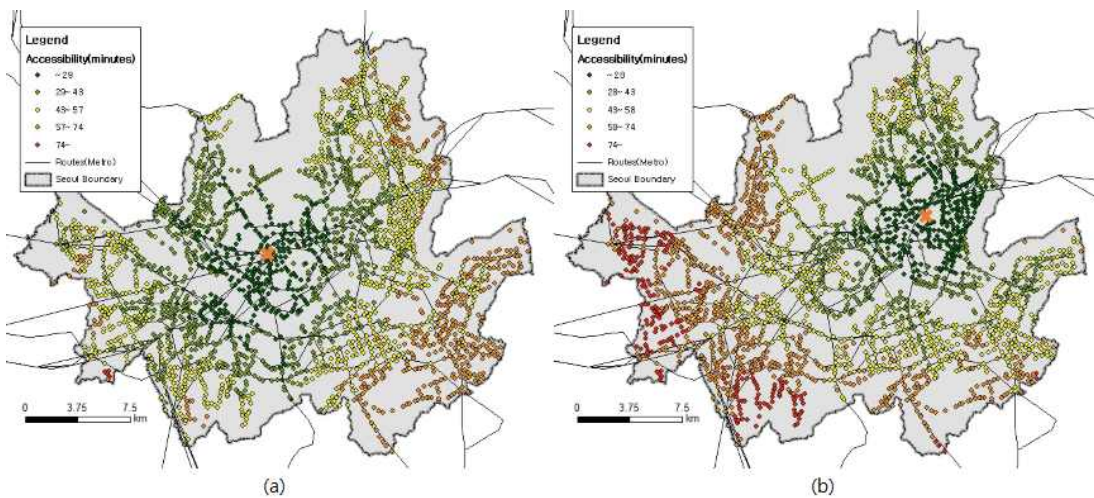


FIGURE 5. Accessibilities from an origin cluster
(a) from Seoul Station cluster, (b) from University of Seoul cluster

준을 확인할 수 있다. 그림 5. a는 서울역 군집에서 출발하였을 때, 서울 내 다른 모든 군집까지의 접근성을 시각화한 결과이다. 서울역 군집을 중심으로 가까울수록 높은 접근성을 먼 지역에서 낮은 접근성을 보인다. 그림 5. b는 서울 시립대 정문 군집에서 출발할 경우 다른 모든 군집까지의 접근성을 표현하였는데, 서울역과의 위치의 차이에 따라 접근성이 부족한 지역과 그 정도가 다르게 나타났다. 또한, 버스와 달리 지하철의 속도가 매우 빠르기 때문에 출발지에서 지하철 노선과 가까울수록 이동시간이 빠르게 나타났다.

3. 서비스 개선량 산출

그림 6은 OD 접근성의 거리별 분포로 거리가 증가함에 따라 접근성이 증가하였다. 위의 선은 해당 거리에서 접근성이 낮은 하위 10%의 경계이며 아래의 선은 접근성이 높은 상위 10%의 경계이다. 중간의 선은 네트워크 거리마다의 평균 접근성(\bar{V}_i)을 의미한다. 이를 통하여 서울시에서 대중교통을 이용할 때, 거리에 따라 기대되는 이동시간을 알 수 있다. 또한, 하위에 존재하는 OD들과 평균 접근성과 차이를 통해, 해당 출도착지를 대중교통으로 이용할 때 상대적으로 더 오래걸리는 시간을 계산할 수 있다. 이

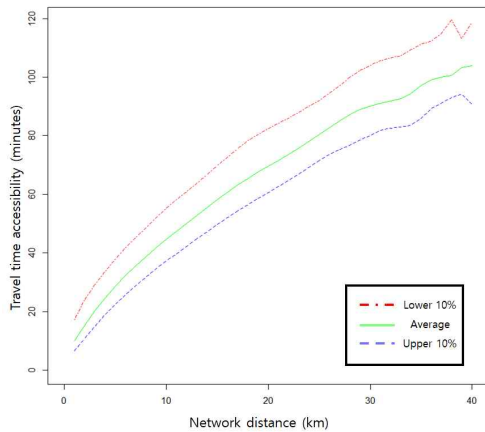


FIGURE 6. The distribution of OD pair accessibility by distance

를 이용하여 대중교통 공급이 상대적으로 낙후된 정도를 이동시간을 기반으로 정량적 지표로 확인할 수 있다.

최종적으로 산출한 OD의 접근성 차이에 수요를 가중하여 서비스 개선량을 도출하였다. 그림 7은 잠재적인 서비스 개선량(g_i)을 큰 순서대로 나열한 그래프이다. 표 4는 그림 7에서 상위 20개에 대한 데이터이다. 각각 일일 통행량(f_i)과 해당 OD의 접근성(t_i), 거리(d_i), 평균 접근성과의 차이, 잠재적으로 개선가능한 시간비용(g_i)을 나타낸다. 본 연구에서는 개선량이 크게 나타나는 상위의 OD 쌍 중에 실질적으로 개선이 가능한지를 경험적으로 확인하였다.

잠재적 개선량이 높게 나타나고 개선이 가능한 OD로 서대문구를 비롯하여 노원구, 구로구, 여의도에 위치한 OD들을 찾을 수 있었다. 그 중에 하나로 그림 8은 표 4의 15번째 OD와 그 주변의 노선을 나타낸 것이다. 15번째 OD는 명동역 군집에서 이화여대 군집으로 향하며, 일평균 235명의 통행량이 발생하였다. 해당 OD를 수송하는 노선으로는 버스 7011번과 7017번이 존재한다. 해당 노선들은 다른 지역으로 우회하게 설계되어있다. 이 노선이 평균적인 수준으로 조정된다면 최대 235.67명이 932.26 man-minutes의 개선이 가능하리라 판단된다.

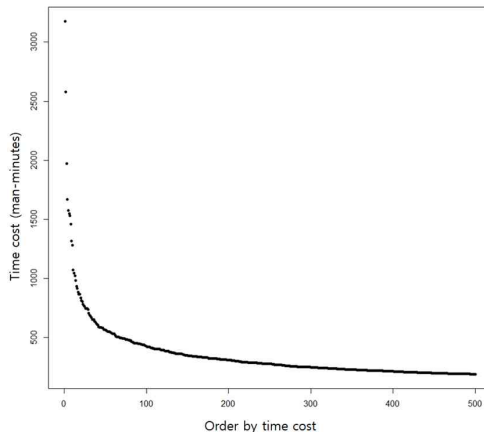


FIGURE 7. Ordering by OD time cost

TABLE 4. Top 20 origin destination pairs in time cost order

Order	Origin cluster name	Destination cluster name	Number of passengers (persons/day)	Accessibility (t_i , minutes)	Network distance (d_i , m)	Accessibility Difference (minutes)	Time cost (g_i , man-minutes)
1	Gangnam Station	Sinnonhyeon Station	822.33	11.85	1209.12	3.86	3175.93
2	Jongno 3(sam)-ga Station	Gwanghwamun	682	12.92	1383.21	3.78	2579.76
3	Gangnam Station	Sinsa Station	1174.67	16.19	2351.40	1.68	1970.41
4	Anguk Station	Myeong-dong Station	439.67	17.78	2264.48	3.80	1669.67
5	Myeong-dong Station	Anguk Station	341.83	18.4	2233.3	4.61	1575.29
6	Jongno 3-ga Station	Myeong-dong Station	218.33	16.26	1389.64	7.08	1545.82
7	Seoul Paik hospital	Gwanghwamun	213.67	19.37	1847	7.16	1529.98
8	Myeong-dong Station	Gyeongbokgung Station	311.83	21.31	2694.05	4.68	1458.57
9	Samho corporation	Yeoksam Station	70	36.25	3001.28	18.76	1313.38
10	Samho corporation	Gangnam Station	184	25.69	3215.02	6.95	1278.74
11	Gyeongbokgung Station	Myeong-dong Station	302	20.17	2694.6	3.54	1069.29
12	Hak-dong Station	Gangnam Station	258	20.08	2596.89	4.05	1043.97
13	Gwankaksa Intersection	Seoul National University Station	275	20.97	2794.49	3.72	1022.32
14	Yongmunsa	Mok-dong Station	188.5	14.85	1460.19	5.20	979.42
15	Myeong-dong Station	Ewha womans university Station	235.67	26.76	4131.1	3.96	932.26
16	Myeong-dong Station	Gwanghwamun	85.17	23.56	1937.75	10.76	916.08
17	Amsa Station	Gubeundari Station	89	21.07	1688.3	9.91	881.9
18	Gusan Station	Bulgwang Station	165.17	16.67	1727.95	5.25	867.08
19	Shinrim 2-dong Garage	Shinrim Station	732.17	1354	2001.96	1.18	866.25
20	Achasan Station	Konkuk University Station	400.5	20.01	2904.95	2.08	833.1

다른 사례로서 그림 9는 노원구에서 창동역이나 노원역으로의 통행 수요가 존재하는 OD들을 보여준다. 해당 지역은 노원구의 주거지역에

서 창동역이나 노원역을 이용하기 위한 승객들이 시간의 손해를 받고 있는 것을 의미한다. 노원구의 승객들이 지하철을 이용하기 위해 발생

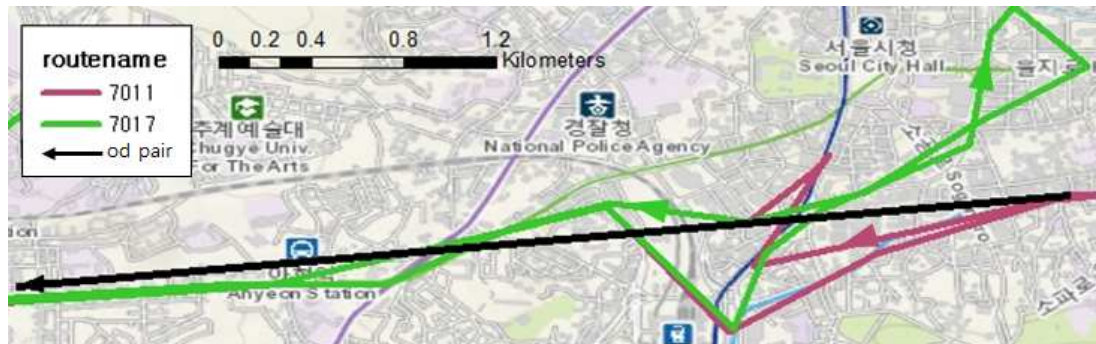


FIGURE 8. Bus routes around the OD from Myeong-dong Station cluster to Ewha Womans University Station cluster

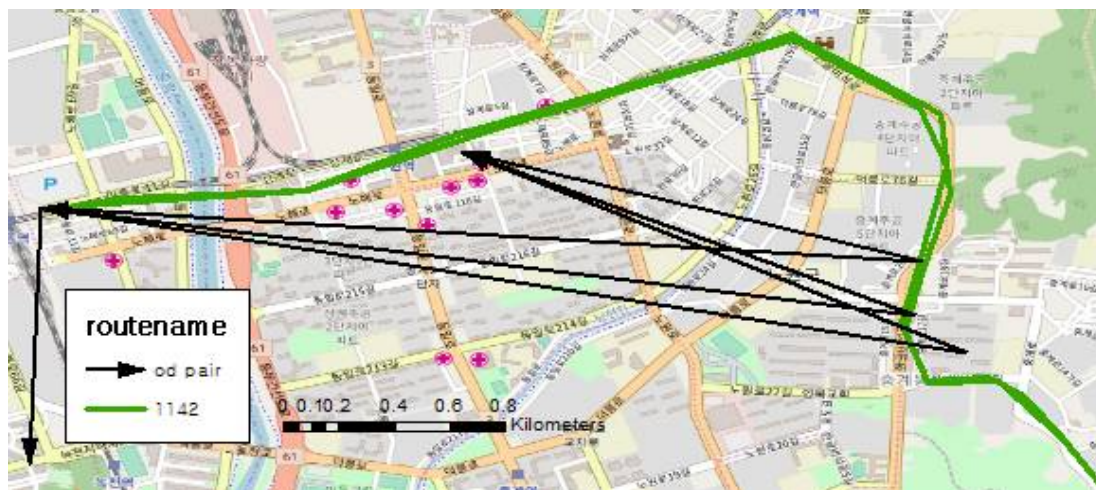


FIGURE 9. Bus routes around the OD Chang-dong and No-won Station cluster

한 수요로 판단된다. 만일 해당 지역을 직결하고 있는 버스 노선 1142번을 수정한다면 최대 973 명이 2695.25 man-minutes의 이득을 볼 수 있을 것이다.

다만 제시한 방법론은 대중교통 네트워크를 조정하여 네트워크의 평균으로 개선할 수 있다는 가정 하에 개선량을 도출하여, 실제로 개선이 불가능한 경우가 존재한다. 가장 높은 개선량을 보이는 강남역 군집에서 신논현역 군집으로 이동하는 OD는 일평균 822명의 사람이 이동하며 이동시 소요되는 시간은 11.85분으로 나타났다. 이는 서울시에서 동일한 거리를 대중교통으로 이동할 때 소요되는 시간이 평균적으

로 15.71분이 나타난 것에 비하면, 상대적으로 이동시간에 3.86분만큼 더 오래걸렸다는 것을 의미한다. 그러나 해당 OD에 존재하는 버스 노선은 우회하거나 굴곡도가 존재하지 않아 개선에는 한계가 존재한다. 이처럼 앞서 제시한 사례와 달리 도로망을 비롯한 현실적인 여건과 비교하여 분석된 개선량만큼의 개선이 어려운 사례도 존재하였다.

결론

본 연구는 이동시간 기반 접근성과 교통카드 데이터를 이용하여 미시적 단위인 정류장 OD의


잠재적 서비스 개선량을 분석하였다. 선행연구들은 수요와 공급을 비교하여 형평성의 관점에서 서비스 개선 지역을 도출하였다. 그러나 교통카드 기반 수요와 같은 통행 데이터를 반영하지 못하여, 실제 수요와 미시적인 공간 단위의 분석이 어려운 한계를 가졌다.

이에 본 연구는 교통카드 데이터로 실제 수요를 반영하여 잠재적 개선량을 정량적으로 분석하였다. 이를 위해 대중교통 네트워크를 비롯한 데이터 들을 구축하였으며, RAPTOR를 이용해 접근성을 산출하고 OD를 비교하였다. 거리별 평균 OD 접근성을 산출하였고, 이를 OD의 접근성과 비교하여 해당 OD가 상대적으로 낙후된 정도를 정량화하였다. 그리고 교통카드 데이터를 이용한 통행량을 가중하여 수요가 많고 낙후된 정도가 큰 결과들을 도출하였다.

본 연구는 서울시를 대상으로 분석을 수행하여 모든 OD에서 잠재적 개선량을 계산하고, 잠재적 개선량이 큰 OD를 경험적으로 확인하였다. 그 결과 서대문구, 노원구, 구로구 등지에서의 노선의 개선이 가능하리라 판단되었다. 반면, 강남역에서 신논현역으로의 OD처럼 개선량은 크게 나타났으나 현실적으로 개선이 어려운 구간도 나타났다.

본 연구는 정류장 단위 OD의 미시적인 공간적 단위로 접근성 지표와 통행량을 고려하여 서비스 불균형 지역을 찾고자하는 연구의 초석 연구이다. 이를 위해 본 연구는 정류장 단위 OD의 시간거리 접근성을 모두 계산하고 이를 교통카드 기반의 실제 통행량과 분석을 시도하였다. 그 결과 정류장 단위 OD의 서비스 개선량을 정량적으로 계산하였다. 노선 조정과 같은 정책적 의사결정 시에 개선이 필요한 구간이나 개선에 따라 이득을 볼 수 있는 사람과 시간비용을 확인할 수 있는 기반자료로서 활용가능하리라 판단된다.

다만 제시한 잠재적 개선량이 크게 나타난 지역을 확인하였을 때, 실제 개선이 어려운 지역들도 도출되었다. 이는 본 연구가 제시한 기법이 개선 가능한 지역만을 찾을 수 없는 한계를 의미한다. 이에 공급과 수요의 상관관계를 고려

하여 서비스 개선량을 도출하는 지표를 개선하고, 서비스 불균형 지역을 도출할 수 있는 군집화 방법을 향후 연구로 수행하고자한다. 향후 연구를 진행하여 다양한 시간대의 접근성과 수요를 가중하는 지표의 개발을 통해 보다 효과적인 서비스 개선 지역을 도출할 수 있으리라 예상된다. 

REFERENCES

- Baek, J.H. 2016. Bus Demand Prediction With Smart Card Data - A Deep Learning Approach. Ph.D. Thesis, Chung-Ang University(백정환. 2016. 스마트 카드 데이터를 통한버스 수요 예측에 관한 연구 - 딥러닝을 활용하여. 중앙대학교 대학원 박사학위논문).
- Bok, J.J and Y.S. Kwon. 2016. Comparable Measures of Accessibility to Public Transport Using the General Transit Feed Specification. Sustainability 8(3):224.
- Cascetta, E., A. Carteni and M. Montanion. 2013. A new measure of accessibility based on perceived opportunities. Procedia-Social and Behavioral Sciences 87:117-132.
- Choi, S.U. 2016. Micro-scale Public Transport Accessibility by Stations : Seoul KTX Stations Case Study. Master thesis, University of Seoul, Seoul, Korea(최승우. 2016. 정류장 단위의 미시적 대중교통 접근성 분석 : 서울시 KTX역 사례 연구. 서울시립대학교 대학원 석사학위논문).
- Currie, G. Quantifying spatial gaps in public transport supply based on social needs. Journal of Transport Geography 18(1):31-41.
- Delling, D., T. Pajor and R.F. Werneck. 2014. Round-Based Public Transit

- Routing. *Transportation Science* 49(3):591-604.
- Farber, S., B. Ritter and L. Fu. 2016. Space-time mismatch between transit service and observed travel patterns in the Wasatch Front, Utah: A social equity perspective. *Travel Behaviour and Society* 4:40-48.
- Farber, S and L. Fu. 2017. Dynamic public transit accessibility using travel time cubes: Comparing the effects of infrastructure (dis)investments over time. *Computers, Environment and Urban System* 62:30-40.
- Han, D.H. 2016. The Analysis of Public Transport Accessibility and Equity in Seoul. Ph.D. Thesis, Konkuk University (한대호. 2016. 서울의 대중교통 접근성과 형평성 분석. 건국대학교 대학원 박사학위논문).
- Kim, D.H and D.J. Park. 2015. A study on Customer-Oriented Measure Methodology of Public Transport Accessibility Under Time and Space Constraints. The 73rd Conference of Korean Society of Transportation:545-550(김동호, 박동주. 시공간 제약하에서 이용자 기반의 대중교통 접근성 측정 방법론 연구. 제 73회 대한교통학회 학술대회지:545-550).
- Kujala, R., C. Weckstrom, M.N. Mladenovic and J. Saramaki. 2018. Travel times and transfers in public transport: Comprehensive accessibility analysis based on Pareto-optimal journeys. *Computers, Environment and Urban Systems* 67:47-54.
- Lee, W.D., Y.G. Na, S.H. Park, B.J. Lee and C.H. Joh. 2012. Transportation Equity Analysis Based on the Metropolitan Household Survey. *Journal of the Korean Urban Geographical Society* 15(1):75-88(이원도, 나유경, 박시현, 이백진, 조창현. 2012. 수도권 가구통행 조사를 바탕으로 한 교통 형평성 분석. 한국도시지리학회지 15(1):75-88).
- Lee, M.H., I.W. Jeon and C.M. Jun. 2017. Clustering Public Transit Stops using an Improved DBSCAN Algorithm. *Journal of the Korean Society for Geospatial Information Science* 25(4):97-106(이민혁, 전인우, 전철민. 2017. 개선된 DBSCAN 알고리즘을 이용한 대중교통 정류장 군집화 기법. 한국지형공간정보학회지 25(4):97-106).
- Lei, T.L and R.L. Church. 2010. Mapping transit based access: integrating GIS, routes and schedules. *International Journal of Geographical Information Science* 24(2):283-304.
- Munizaga, M. A and C. Palma. 2012. Estimation of a disaggregate multimodal public transport Origin-Destination matrix from passive smartcard data from Santiago, Chile. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 24:9-18.
- Noh, H. S., T. W. Doh, W. K. Kim, C. S. Cho and S. I. Shin. 2005. Transit Mobility Measures on the Seoul Multimodal Network. *Journal of Korean Society of Transportation* 23(8):7-17(노현수, 도철웅, 김원근, 조종석, 신성일. 2005. 대중교통망 이동성지표 개발: 네트워크 분석을 중심으로. 대한교통학회지 23(8):7-17).
- Park, J. H., S. G. Kim, C. S. Cho and M. W. Heo. 2008. The study on error, missing data and imputation of the smart card data for the transit OD construction. *Journal of Korean Society of Transportation* 26(2):109-119(박준환,

- 김순관, 조종석, 허민욱. 2008. 대중교통 OD 구축을 위한 대중교통카드 데이터의 오류와 결측 분석 및 보정에 관한 연구. 대한교통학회지 26(2):109-119).
- Park, J.S and K.S. Lee. 2017. Development of Integrated Accessibility Measurement Algorithm for the Seoul Metropolitan Public Transportation System. Journal of the Korean Regional Science Association 33(1):29-41(박종수, 이금숙. 2017. 서울 대도시권 대중교통체계의 통합 시간거리 접근성 산출 알고리즘 개발. 한국지역학회 33(1):29-41).
- Sun, Y and H.F. Lin. 2015. GIS-Based Analysis of Public Transit Accessibility: Definition and Display. CICTP 2015:1213-1224.
- Woo, W.H. 2014. Origin-Destination Trip Matrices Estimation with Open Data. Ph.D. Thesis, Myongji University(우왕희. 2014. 공공데이터를 이용한 기종점 통행량추정방안 연구. 명지대학교 대학원 박사학위논문).
- Yun, J.G and M.J. Woo. 2015. Empirical Study on Spatial Justice through the Analysis of Transportation Accessibility of Seoul. Journal of Korea Planning Association 50(4):69-85 (윤종진, 우명제. 2015. 서울시 대중교통 접근성의 공간적 정의에 대한 실증연구. 국토계획 50(4):69-85). 