

스마트카드 자료를 활용한 통근통행 추정과 통근네트워크 구조 분석*

- 가구통행실태조사자료와 비교검증을 통한 활용가능성을 중심으로 -

The estimation of commuting pattern and the analysis of the commuting network structure using smart card data

- Focused on the possibility of application through the validation process with household travel survey data -

하재현** · 이수기***
Ha, Jaehyun · Lee, Sugie

Abstract

This study examines the possibility of application of smart card data for analyses of commuting patterns and the commuting network structure through the validation process using the household travel survey data. First, this study develops four different methods to extract journey-to-work trips from the smart card data that does not include trip purposes. Second, this study identifies the best method to extract journey-to-work trips from smart card data from the validation process. Lastly, this study investigates to what extent smart card data is able to estimate the commuting network structure using the prestige centrality index. The results confirm that estimated commuting patterns from the smart card database are reasonable comparing to the results from the traditional household travel survey data. This finding indicates that smart card data could be used to analyze commuting patterns and commuting network structure. However, since smart card data include public transportation only, it should be used with the traditional household travel survey data for an analysis of commuting patterns including other transportation modes. Despite a few limitations, this study points out that smart card data has substantial benefits for an analysis of commuting patterns and the commuting network structure using the real-time travel information.

키 워 드 ■ 빅데이터, 스마트카드 자료, 통근통행패턴, 통근 네트워크, 대중교통

Keywords ■ Big Data, Smart Card Data, Commuting Pattern, Commuting Network, Public Transportation

I. 서 론

석하고, 이를 활용하여 도시의 통행네트워크 구조를 살펴보는 것은 도시계획, 인구이동, 교통문제 등 다 도시에서 발생하는 다양한 목적의 통행패턴을 분 양한 측면에서 매우 중요한 주제이다. 실제로, 통행

* 이 논문은 2015년 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(한국연구재단-NRF2015H1A2A1034449-글로벌박사양성사업)이며, 2015년 10월 대한국토·도시계획학회 추계학술대회에서 발표한 논문을 수정·보완한 것임

** Dept. of Urban Planning & Engineering, Hanyang University (First author: jaehyunha@hanyang.ac.kr)

*** Dept. of Urban Planning & Engineering, Hanyang University (Corresponding author: sugielee@hanyang.ac.kr)

네트워크 구조는 도시의 구조를 분석하는 데 있어 가장 적절한 지표로 알려졌으며(Ayeni, 1979; 정윤영·분태현, 2014 재인용), 인구밀도나 사업체밀도 등의 자료를 활용하지 않고 도시의 통근 네트워크만을 활용하여 도시공간구조를 분석하는 연구가 다수 진행되었다(이희연·김홍주, 2006a; 박경철·좌승희, 2009). 하지만, 도시민들의 통행패턴을 확인하고, 통행네트워크 구조를 통해 도시의 공간구조를 분석하는 기존의 방법은 자료 수집의 어려움으로 4년 혹은 5년마다 시행되는 설문조사를 통해 얻은 표본의 특성을 전수화하여 도시민들의 통행패턴을 파악함으로써 한계를 가지고 있다고 볼 수 있다.

최근에 들어서는 도시민들이 대중교통 이용 시 사용하는 스마트카드를 통해 기록된 통행행태 자료가 도시민들의 통행패턴을 분석하는 데 있어 주목받고 있다. 스마트카드 자료는 대중교통을 이용한 통행에 한해서 전수조사에 가까운 자료로 매일 축적되기 때문에, 가구통행표본조사를 활용한 기존의 방법론에 비하여 더 많은 분석 시점에 대해 통행패턴이나 통근 네트워크 구조를 분석할 수 있다는 장점이 있다. 실제로, 김순관(2015)에 따르면, 우리나라의 경우 교통카드 자료가 대중교통 이용자의 95% 정도를 반영하고 있다. 더 나아가, 대중교통 노선 공급 또는 기업이전과 같은 도시정책이 도시민들의 통행패턴 및 도시의 구조에 어떠한 영향을 미치는지를 시계열적으로 분석할 수 있게 한다는 점에서 잠재력이 있다. 하지만, 스마트카드 자료의 구득 및 가공이 어렵다는 점과 함께 자동차나 보행 또는 기타수단을 통해 이동하는 도시민들의 통행을 파악하지 못한다는 한계를 가지고 있다.

그럼에도 불구하고 기존 몇몇 연구에서는 스마트카드 자료를 통해 대중교통수단을 이용한 도시민들의 통행패턴을 규명하는 연구가 진행되었다(민미영 외, 2011; 김관호 외, 2013; Long et al., 2012; Ma et al., 2013; Long & Thill, 2015). 스마트카드

자료가 대중교통 수단을 이용한 통행의 패턴만을 설명하더라도, 서울시의 경우 특히 대중교통이 차지하는 수단 부담률이 높기 때문에 스마트카드 자료의 활용가능성과 가치가 높다고 볼 수 있다. 스마트카드 자료의 활용은 기존에 발생하던 조사비용을 줄일 수 있을 뿐만 아니라, 도시민들의 통행패턴과 통행네트워크에 기반을 둔 도시공간구조의 변화를 시계열적으로 관찰할 수 있게 하여 다양한 도시정책의 모니터링을 가능하게 할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 스마트카드(smart card, SC) 자료를 활용하여 통근통행을 추정하고, 통근네트워크의 구조를 분석하고자 한다. 더 나아가, 분석된 결과를 가구통행실태조사(household travel survey, HTS)의 자료와 비교함으로써 스마트카드 자료를 활용한 통근 OD 및 통근 네트워크의 추정이 어느 정도 수준에서 가능한지, 어떠한 방식으로 추정하는 것이 가장 적합한지를 논의하고자 한다. 이뿐만 아니라, 본 연구는 대중교통 수단에 대한 통행 자료만으로 전체수단에 대한 통행량을 추정할 수 있는지 확인하고자 한다. 본 연구의 결과는 향후 스마트카드 자료를 활용하여 통근통행을 추정하고 통근네트워크의 구조를 분석하는 데 있어, 스마트카드 자료의 활용방안 확립에 크게 기여할 것으로 기대된다.

II. 선행연구 검토

1. 통행패턴과 통행네트워크 구조의 분석

도시민들의 통행패턴은 도시에서 발생하는 다양한 활동들과 일상생활을 전반적으로 파악할 수 있게 해준다. 또한, 추가적인 분석을 통해 통행행태가 영향을 주거나 영향을 받는 요인들을 설명할 수 있다는 점에서 의미가 있다. 통행행태를 다룬 초기 연구들은 대부분 통근목적의 통행에 집중하여 대도시에서 발생하는 초과통근, 통행의 효율성이나 인구

·사회적인 특성별 통행패턴에 대해 분석하였다(전명진, 1995; 송미령, 1998; 이삼수, 2004; Peng, 1997). 더 나아가, 통행행태에 영향을 주는 원인으로 도시 난개발이나 도시의 확장, 공공기관의 이전이나 대규모 개발사업 등을 다루었으며, 통행패턴이 교통에너지 소비에 영향을 줄 수 있음을 밝힌 연구도 진행되었다(최은진 외, 2010; 김보현 외, 2013; Scott et al., 1997). 이들 연구는 대부분 수도권교통본부 주관 하에 조사되는 가구통행실태조사자료나 정부에서 실시하는 인구구조사의 통근 자료를 이용하고 있으며, 수도권의 경우에는 80~90년대 이후 4~5년 단위로 자료가 수집되어 활용되고 있다.

한편, 통근통행의 네트워크 구조를 살펴봄으로써 도시의 공간구조를 분석하는 연구도 상당수 진행되었으며, 신도시 건설과 같은 도시정책의 결과를 검증하는 방법으로 이용되고 있다(손승호, 2005; 이희연·김홍주, 2006a, 2006b; 이희연·이승민, 2008; 이수기 외, 2015; Irwin & Hughes, 1992; Hughes, 1993). 이희연·김홍주(2006a)는 1980년부터 2000년까지의 통근자료와 네트워크 분석방법을 활용하여 수도권 공간구조의 변화를 살펴보고자 하였다. 이들은 수도권 시군구 지역의 중심성을 산출하여 수도권 지역의 공간구조를 파악하고자 하였으며, 네트워크 분석에서 각 결절점이 차지하는 중심성을 측정하기 위해 연결중심성과 위세중심성 지수를 이용하였다. 연결중심성의 경우, 특정 결절점이 다른 점들과 연결된 정도가 높을수록 그 결절점의 중심성이 일정 지역 내에서 높다는 것을 의미한다. 반면, 위세중심성의 경우, 특정 결절점이 네트워크 전체의 구조에서 전략적으로 중요한 자리에 위치하는지를 의미해(박경철·최승희, 2009), 도시공간구조를 분석하는 데 있어 더 적합하다고 볼 수 있다.

이와 비슷한 맥락에서, 이희연·김홍주(2006b)는 서울대도시권의 통근네트워크 구조 변화와 네트워크 구조상에서 가장 지배적이고 중심적인 역할을

하는 결절점을 분석하고자 하였다. 한편, 박경철(2009)은 수도권 가구통행실태조사의 통행량과 통행자의 특성을 활용하여 네트워크 분석을 시행함으로써 수도권의 공간구조 변화를 규명하고자 하였다. 이들은 도시민들의 통행을 통행목적과 통행자의 속성에 따라 나누어 통행네트워크를 구축하고, 이에 대해 네트워크 분석을 시행하였다. 분석결과, 수도권 공간구조가 전반적으로 광역화되었음을 파악하였으며, 특정 목적의 경우, 경기도의 독립적인 통행권이 형성되어 있는 것을 확인하였다.

비교적 최근에는, Zhong et al.(2014)이 싱가포르의 스마트카드 자료를 활용하여 도시구조의 변화를 살펴보았다. 이들은 2010년부터 2012년까지 1년 시차의 스마트카드 자료를 이용하여 버스정류장 및 지하철역을 하나의 결절점으로 통행네트워크를 구축하고, 네트워크 분석을 수행하였다. 이처럼, 국내 외에서는 통근목적의 통행네트워크 구조를 분석함으로써 최종적으로는 도시의 공간구조를 설명하고자 한 연구가 소수 진행된 상황이다.

비교적 최근에는 빅데이터를 활용하여 도시민들의 통행패턴을 분석하는 방법이 관심 받고 있으며, 자료의 수집·저장·가공 기술의 발달로 진행되고 있다. 예를 들어, 도시민들이 사용하는 스마트폰의 GPS 장치를 통해 기록된 자료나 대중교통 이용자들이 사용하는 스마트카드의 기록을 활용해 도시민들의 통행행태나 특성을 파악하는 연구가 이루어졌다(Diao et al., 2015; Calabrese et al., 2013). 더 나아가, 스마트폰이나 스마트카드의 사용으로 인해 생성된 빅데이터 자료가 설문조사를 기반으로 수집되는 자료를 대체 또는 보완해줄 수 있는지에 대한 여부도 논의되고 있다(Pelletier et al., 2011; Trepanier et al., 2009). 빅데이터 자료는 설문조사 자료와는 달리 자료의 수집을 위한 경제적 및 시간적 비용이 적게 들고 거의 모든 시점에 대해 자료가 수집된다는 점에서 중요한 의미를 가진다.

2. 스마트카드 자료를 활용한 연구

기술의 발달로 인해 스마트카드 자료의 수집과 저장, 그리고 활용이 용이해짐에 따라 스마트카드 자료를 이용한 연구가 국내외에서 소수 진행되었다. 스마트카드 자료를 활용한 국내 연구는 교통수단별 이용자, 환승 승객수, 탑승시간, 통행시간 등을 다룬 박진영·김동준(2007)의 초기연구를 시작으로 대중교통 지향형 개발개념과의 연계, 대중교통 승하차 수요분석에 따른 토지이용 특성 연구, 승객의 통행 흐름 시각화 등 다양한 측면에서 이루어져 왔다(김호성 외, 2010; 성현곤 외, 2008; 이정우 외, 2015). 한편 국외에서는 스마트카드 자료의 잠재력을 다룬 연구, 스마트카드 자료와 통행실태조사자료를 동시에 활용하여 직장지와 주거지 간의 관계에 관해 살펴본 연구, 스마트카드 자료를 활용하여 통행네트워크의 구조를 살펴본 연구가 있다(Trepanier et al., 2009; Pelletier et al., 2011; Long & Thill, 2015; Zhong et al., 2014).

이와 더불어, 스마트카드 자료를 이용해 도시민들의 통행행태를 확인한 연구도 진행되었다(빈미영 외, 2011; 김관호 외, 2013; 신임호 외, 2012). 우선, 빈미영 외(2011)는 2011년도 스마트카드 자료를 이용하여 대중교통 이용자의 출발지와 목적지까지의 환승을 포함한 통행사슬개념을 토대로 통행패턴을 분석하였다. 이 연구는 도시민들의 대중교통 이용 행태를 구체적으로 분석하였다는 점에서 의의가 있지만, 일반적으로 통행네트워크 구축 시 활용하는 OD 형태의 통행패턴 개념과는 다소 거리가 있다. 한편, 김관호 외(2013)는 스마트카드 자료를 이용해 지리적으로 유사한 기능을 수행하는 지역을 파악하고 이들 간의 연관성을 확인하였다.

스마트카드 자료의 활용 및 잠재력과 관련하여 김순관 외(2007)는 스마트카드 자료가 대중교통 통행패턴 분석, 용량분석, 대중교통 서비스수준 평가

등 여러 측면에서 그 활용가능성이 높다고 보고하였다. 또한, 이들의 연구에서는 스마트카드 자료를 기존의 가구통행실태조사자료를 대체하기 위해서 스마트카드 자료의 통행목적을 논리적으로 유추할 수 있는 방법론 개발이 필요함을 지적하였다. 이의 일환으로 2002년 가구통행실태조사의 대중교통 OD와 2007년 3~4월 스마트카드 자료를 통해 구축한 OD 중 오전첨두 시간대에 해당하는 자료를 비교하였다. 그 결과, 가구통행실태조사자료와 스마트카드 자료 각각에 대해 파악한 행정구별 오전 첨두 통행 발생량 및 통행 도착량이 비슷한 패턴을 보이는 것으로 나타났다. 이에 따라, 스마트카드 자료를 통해 구축한 OD 자료가 기존의 가구통행실태조사자료를 보완할 뿐만 아니라, 대체할 수 있을 것으로 예상하였다. 그러나 이 연구에서 활용한 두 개 자료의 시차는 5년으로 비교하기에는 다소 시차가 있고, 스마트카드 자료 중 통근목적의 통행을 추정할 수 있는 방법을 충분히 다루지 않았다는 한계가 있다.

한편, 한상욱 외(2015)는 스마트카드 자료를 이용하여 주요 역세권에 한하여 대중교통을 이용한 통근자의 주거지 분포를 살펴보았다. 이 연구에서는 통근목적의 통행을 스마트카드 자료로부터 추출하고자, 주중 5일 모두 출퇴근 시간에 스마트카드 사용기록이 있고, 출퇴근 시간 사이에는 통행하지 않는 조건을 이용하였다. 이 연구의 경우, 스마트카드 자료로부터 통근목적의 통행을 추정하였지만, 그 추정방법이 적합한지에 대해서는 다루지 않았다. 비교적 최근에는, 김지윤 외(2015)가 스마트카드 자료를 이용하여 서울시 423개 행정동별 대중교통 이용에 영향을 미치는 요인을 분석하였으며, 이를 위해 스마트카드 자료 중 시간대별 승하차 인원을 행정동 단위로 집계하여 사용하였다.

스마트카드 자료와 통행실태조사자료를 비교한 Trepanier et al.(2009)의 연구에서는 지점 간 이동 경로 측면에서 두 자료가 5% 유의수준에서 일치함

을 밝혔다. 더 나아가, 스마트카드 자료가 통행실태 조사자료에 비해 정밀하며 통행실태조사자료에서는 집계되지 않는 통행행태를 포함한다고 보고하였다. 스마트카드 자료의 잠재력을 다룬 Pelletier et al.(2011)은 스마트카드 자료가 교통분야 연구를 진행함에 있어 활용성이 높음을 지적하였고, 스마트카드 자료를 통해 통행의 목적지를 예측하거나 통행행태에 관련한 연구를 진행할 수 있음을 보고하였다. 한편, 김순관(2015)은 스마트카드 자료의 활용 가능성이 제고되기 위한 방안으로 자료 공개의 제도화, 자료 구축 및 가공과정의 정례화, 스마트카드 이용자의 사회경제적 지표와의 연계, 가공 및 집계된 자료의 주기적 공개 및 활성화를 제시하였다.

3. 본 연구의 차별성

선행연구 검토를 통해 살펴보았듯이, 스마트카드 자료를 이용하여 통행행태를 다루고 있는 연구는 세 가지 측면에서 한계를 가진다. 첫째, 기존 연구는 스마트카드 자료의 통행자료 중 통근목적의 통행을 추출하기 위해 일련의 과정을 거치긴 하였지만, 하나의 방법만을 자의적으로 선택하여 분석을 진행하였다. 이는 스마트카드 자료를 통해 통근목적의 통행을 정확하게 추정하였는지를 파악할 수 없다는 한계를 가진다. 둘째, 스마트카드 자료와 가구통행실태조사자료와의 비교분석을 진행한 연구의 경우, 두 자료의 수집시점 간 시차가 5년으로, 직접적으로 비교하기에는 부적합한 면이 있다. 또한, 기존 연구에서는 행정구를 단위로 통행의 발생량이나 도착량을 중점적으로 살펴보고 있어, 기종점 형태의 통행패턴 측면에서 자료를 비교하였다고 보기는 어렵다. 셋째, 스마트카드 자료의 통행네트워크를 이용해 지역별 중심성을 살펴본 연구는 버스정류소 또는 지하철 정류장과 같은 최소집계단위를 이용하고 있다. 이는 각 정류소 및 정류장의 중심성만을

파악할 수 있으며, 전체 도시의 구조를 파악하는데 한계를 가진다.

본 연구의 차별성은 다음과 같다. 첫째, 스마트카드 자료를 통해 통근통행 OD 자료를 추정할 수 있는 방법을 제안하고, 추정된 통근통행 자료가 가구통행실태조사자료와 어느 정도의 상관성을 가지는지에 대해 살펴보았다. 더 나아가, 스마트카드 자료만으로 모든 수단에 대한 통행네트워크를 추정할 수 있는지에 대해 살펴보았다. 이를 통해 향후, 스마트카드 자료를 활용하는 연구에 방법론적인 측면에서 시사점을 제공해줄 수 있을 것으로 판단된다.

둘째, 가구통행실태조사자료와 스마트카드 자료를 활용하여 네트워크 분석 지표 중 위세중심성을 산출한 후, 두 자료에서 도출된 값을 비교하였다. 실제로, 위세중심성은 통행 네트워크를 활용하여 도시의 공간구조를 분석할 때 자주 활용되는 지표이며, 이 과정을 통해 스마트카드 자료를 이용한 통근네트워크 구조의 모니터링이 가능한지를 판단할 수 있을 것으로 보인다.

마지막으로, 본 연구에서는 스마트카드 자료를 통해 도시민들의 통행패턴 및 통행네트워크를 구축하는 데 있어 적합한 공간적 분석단위를 논의하였다. 기존 연구에서는 버스정류소 또는 지하철 정류장을 단위로 분석을 시행하고 있으나, 정류소 또는 정류장의 지점을 단위로 할 경우, 도시의 전반적인 공간구조를 분석하고 그 결과를 해석하는 데 어려움이 있다. 이에 따라, 본 연구에서는 스마트카드 자료를 분석하기에 적합한 단위로 행정동, 도보생활권, 시군구 단위를 살펴보았다.

본 연구는 스마트카드 자료를 이용하여 통행행태 분석 및 통근네트워크 구조를 분석하는 데 있어, 그 잠재력을 다루고자 하며, 이는 아직 논의된 바가 적다는 점에서 차별성이 있다. 또한, 스마트카드 자료 이용시 나타날 수 있는 통근통행 추정방법 및 분석의 공간적 단위 문제에 대해 살펴보려고 한다.

III. 분석의 틀

1. 분석자료

본 연구는 스마트카드 자료에서 통근 목적의 통행을 추정하고, 추정된 통행 자료를 검증하기 위해 기존에 통행행태를 관찰하고자 사용하고 있는 설문조사 기반의 자료와 비교하고자 하였다. 이를 위해 2011년 3월에 기록된 한 주 분량의 스마트카드 자료와 2010년 가구통행실태조사의 통근자료를 활용하였다. 스마트카드 자료와 가구통행실태조사자료의 시점이 다소 상이하지만, 스마트카드 자료의 구득이 가능한 범위 내에서 자료를 이용하였다. 또한, 자료의 한계로 연구의 공간적 범위를 서울시 내에서 이루어지는 통행으로 한정하여 분석을 진행하였다.

우선, 스마트카드 자료의 경우에는 사용자의 ID, 이용된 교통수단, 통행의 출발 및 도착시각, 지하철역 혹은 버스정류장 식별 ID로 된 각 통행의 출발지와 도착지 등이 기록된 자료로 구성되어 있다. 가구통행실태조사자료와의 비교를 위해 스마트카드 자료를 행정동 단위로 재집계한 후, 기종점(OD) 자료로 재가공하여 분석에 활용하였다. 이를 위해, 스마트카드 자료에 포함되어 있는 지하철역과 버스정류장의 X, Y 좌표를 활용하였으며, 경기도와 인천 광역시에 위치한 일부 버스정류장의 위치를 파악하는 것이 불가능하여 서울시 424개 행정동 내에서 이루어진 통행에 대한 자료만 이용하였다.

한편, 2010년 가구통행실태조사 원시자료를 이용하기 위해, 가구원별 통행목적, 출발지와 도착지, 통행별 전수화계수를 이용하였으며, 서울시 행정동을 대상으로 424 × 424 구조의 통행 네트워크 자료를 생성하여 기본 자료구조로 이용하였다. 더 나아가, 본 연구에서는 스마트카드 자료를 통해 파악한 대중교통 수단에 대한 통행네트워크 자료만을 이용하

여 전체 수단의 통행량을 추정하고자 하였다. 이를 위해 2010년 가구통행실태조사의 원시자료에 산출되어 있는 전수화계수를 이용하여 지역 간 통행의 대중교통 교통수단분담비율을 산출하였다. 이 과정에서 활용한 계산방법은 다음과 같다.

$$Ratio_{transit}^{A \rightarrow B} = \left(\frac{\sum_i T_{transit_i}^{A \rightarrow B}}{\sum_i T_{transit_i}^{A \rightarrow B} + \sum_j T_{others_j}^{A \rightarrow B}} \right)$$

$Ratio_{transit}^{A \rightarrow B}$ = A→B로의 대중교통 수단분담비율

$T_{transit_i}^{A \rightarrow B}$ = A→B로 통행시 대중교통수단 선택 표본 i의 전수화계수

$T_{others_j}^{A \rightarrow B}$ = A→B로의 통행시 대중교통 외 수단 선택 표본 j의 전수화계수

한편, 지역 간 대중교통수단분담비율을 활용한 전체 수단 통행량 추정방법은 다음과 같다. 이를 통해, 스마트카드 자료만으로 전체 수단에 대한 지역 간 통행량을 어느 정도 추정할 수 있는지에 대해 살펴보고자 하였다. 가령, 스마트카드 자료를 통해 파악한 A지역에서 B지역으로의 대중교통 수단 통행이 600명이고, 가구통행실태조사자료를 통해 도출한 A지역에서 B지역으로의 통행 시 대중교통 분담비율이 25%일 때, 스마트카드 자료를 활용해 추정된 전체수단 통행량은 2,400명으로 볼 수 있다.

$$Estimated Trip_{total}^{A \rightarrow B} = Trip_{transit}^{A \rightarrow B} \times \frac{1}{Ratio_{transit}^{A \rightarrow B}}$$

$Estimated Trip_{total}^{A \rightarrow B}$ = A→B로의 전체수단 통근통행량 (추정치)

$Trip_{transit}^{A \rightarrow B}$ = A→B로의 대중교통 통근통행량

$Ratio_{transit}^{A \rightarrow B}$ = A→B로의 대중교통수단분담비율

2. 분석과정 및 방법

분석과정의 전반적인 틀은 그림 1에 제시되어 있다. 본 연구는 스마트카드 자료 중 통근목적의 통행을 추정하고, 이를 가구통행실태조사자료의 통근 OD 자료와 비교검증을 하고자 다음의 분석과정을 거쳤다. 첫째, 스마트카드 자료 중 대중교통을 이용한 통근통행을 추출하기 위해 네 가지 방법을 이용하였으며, 버스, 지하철, 버스와 지하철을 모두 이용한 경우, 대중교통 전체 수단에 대해 각각 구축하였다. 연구에서 활용한 네 가지 방법은 표 1에 제시되어 있다. 표 1의 내용 중, '출근시간대 발생 통행'은 오전 7시부터 9시 사이에 이루어진 통행을 의미한다. 구체적으로는 오전 7시 이후에 출발하여, 오전 9시 이전에 도착한 통행을 대상으로 하고 있으며, 이는 김순관 외(2007)에서 접근하고 있는 방식과 맥락을 같이한다. 한편, '주중 반복 통행'은 주중을 기준으로 특정 출발지와 도착지 간 통행이 사용자 ID별로 3회에서 5회 반복된 통행을 의미한다. 앞서 언급한 '출근시간대 발생 통행'의 경우, 출근 시간대 이외에 발생한 통행을 포함할 수 없으므로, 대중교통을 이용하여 출근하는 도시민들이 동일한

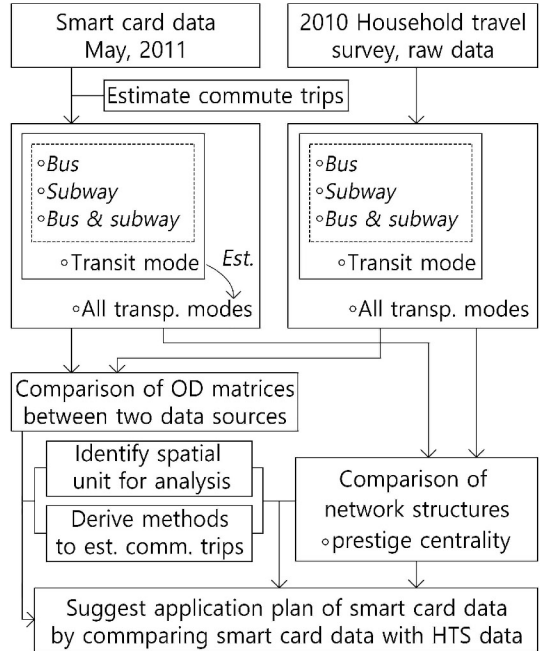


그림 1. 분석의 틀
Figure 1. Framework of analysis

통행을 반복하였을 것이라고 판단하였다.

둘째, 2010년 가구통행실태조사자료를 이용하여 통근의 목적을 가지는 통행 중 버스 수단, 지하철 수단, 그리고 두 수단을 모두 이용한 경우를 각각

표 1. 스마트카드 자료를 활용한 통근목적 통행 추정방법

Table 1. Methodologies for estimating commute tips using smart card data

| 추정방법 Estimation methods | 명칭 ²⁾ Abbrev. | 추정 방법의 의미 Description of estimation methods |
|---|-----------------------------|--|
| 출근시간대 발생 통행 Peak hours travel | PHT | 출근시간대(오전 7시~9시 사이)에 발생한 통행을 통근통행으로 추정 Estimating trips occurred in peak hours as commute trips |
| 주중 3회 이상 반복 통행 Repeated travel more than 3 times | RT_3 | 사용자별로 특정OD간 3회 이상 반복된 통행을 통근통행으로 추정 Estimating trips repeated more than 3 times during weekdays as commute trips (for every smart card user ID) |
| 주중 4회 이상 반복 통행 Repeated travel more than 4 times | RT_4 | 사용자별로 특정OD간 4회 이상 반복된 통행을 통근통행으로 추정 Estimating trips repeated more than 4 times during weekdays as commute trips (for every smart card user ID) |
| 주중 5회 반복 통행 Repeated travel for 5 times | RT_5 | 사용자별로 특정OD간 5회 동안 반복된 통행을 통근통행으로 추정 Estimating trips repeated 5 times during weekdays as commute trips (for every smart card user ID) |

추출하였다. 이 과정에서는 원시자료에 산출되어 있는 가구원별 전수화계수를 이용하였으며, 가구통행실태조사의 최소 집계단위인 행정동을 단위로 기종점 통행량 자료를 구축하였다. 한편, 스마트카드 자료만을 통해 전체수단 통행량을 추정하기 위하여, 가구통행실태조사 원시자료를 이용하여 지역 간 대중교통수단분담비율을 산출하였다.

셋째, 스마트카드 자료와 가구통행실태조사자료를 이용해 추정 및 구축한 대중교통 수단별 통근통행 기종점 자료를 비교·분석하였다. 더 나아가, 스마트카드 자료를 통해 추정한 전체수단 자료와 가구통행실태조사 자료의 통근 기종점 자료를 비교분석하였다. 이 과정에서는 스마트카드 자료 중 통근통행 추정방법 4가지, 통행수단 5가지(버스, 지하철, 버스·지하철, 대중교통, 전체수단)를 모두 고려하여 총 20가지의 기종점 자료 유형을 비교하고자 하였다. 더 나아가, 분석의 공간적 단위를 고려하고자 행정동 단위(424 × 424), 생활권 단위(5분 도보: 151 × 151, 10분 도보: 89 × 89), 시군구(25 × 25)단위별로 비교분석을 진행하였다(그림 2, 3 참고). 최종적으로는 총 80가지 유형으로 구축된 기종점 자료를 대상으로 분석을 진행하였다. 기종점 통행량에 대한 분석은 Pearson 상관분석을 통해 이루어졌다.

앞서 언급한 생활권 단위로 한 분석의 경우, 네트워크 분석방법 중 하나인 Community Detection을 이용하여 행정동을 단위로 한 생활권을 설정하였다. Community Detection방법¹⁾은 네트워크 구조의 응집력(Cohesion)을 분석하여, 지역 간 네트워크 자료에서 나타나는 상호 연계특성에 따라, 지역을 몇 개의 권역으로 구분해주는 분석기법이다(Newman, 2006: 정윤영·문태현, 2014 재인용). 이를 통해, 통근 목적의 통행 중, 5분 및 10분 이내에 이루어지는 도보 통행네트워크 자료를 활용하여, 상호 연계되어 있는 정도가 높은 지역을 파악하고, 이를 생활권으로 설정하였다.



그림 2. Community Detection을 통해 도출한 5분 생활권 및 행정동 경계
Figure 2. Boundaries of spatial units (Administrative dong and 5 min. living zones)

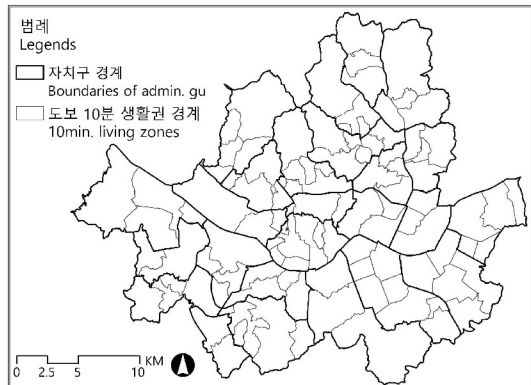


그림 3. Community Detection을 통해 도출한 10분 생활권 및 자치구 경계
Figure 3. Boundaries of spatial units (Administrative gu and 10 min. living zones)

본 연구에서 도보생활권을 분석단위로 살펴본 이유는 다음과 같다. 우선, 스마트카드 자료를 이용할 경우, 버스정류장이 행정동 경계에 다수 위치하여 있기 때문에, 행정동 경계에서 출발 또는 도착한 통행을 각 행정동에 출발 또는 도착하였다고 보기는 어렵다(그림 4 참고). 또한, 지하철역의 경우, 지하철역이 위치하지 않은 행정동이 424개 중 214개로, 스마트카드 자료 중 지하철수단을 이용한 통행

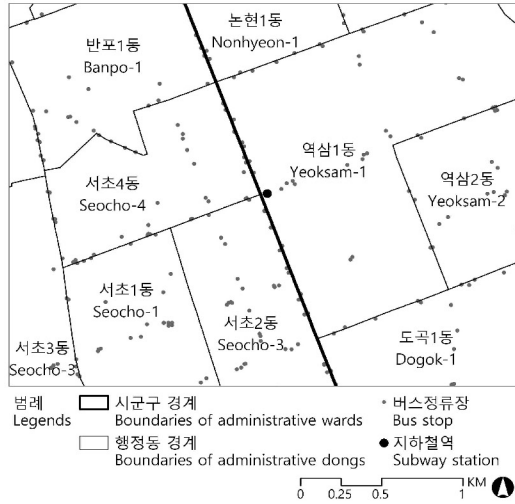


그림 4. 스마트카드 자료의 버스정류장 및 지하철역 위치 (강남역 주변 예시)

Figure 4. Locations of bus stops and subway stations provided from smart card data (Case of Gangnam-station area)

을 행정동 단위의 기종점 자료로 구축하는 데 한계가 있다(그림 4 참고). 이에 따라, 본 연구에서는 향후 스마트카드 자료를 이용하는 데 있어 나타날 수 있는 분석의 공간단위 문제를 살펴보고자 한다.

마지막으로, 스마트카드 자료와 가구통행실태조사자료를 통해 구축한 통근 네트워크 자료를 활용하여 네트워크 분석을 시행하고, 두 자료의 결과를 비교하였다. 이 과정에서는 앞서 도출하였던 스마트카드 자료를 활용한 통근통행 추정방법 및 스마트카드 자료 분석에 있어서 적합한 분석 공간단위를 이용하였다. 한편, 네트워크 분석지표의 경우, 지표의 값 자체보다는 지역 간 순위가 더 중요하다고 판단하여 스피어만 상관분석을 시행하였다. 이 과정을 통해 스마트카드 자료를 활용한 통근네트워크 구조의 분석, 더 나아가 도시공간구조를 분석하는 것이 타당한지에 대해 살펴보고자 하였다. 네트워크 분석은 각 자료별 지역 간 기종점 통행량 자료와 R 3.1.3의 igraph 패키지를 활용하여 산출하였다.

IV. 분석결과

1. 통근목적 OD자료 비교분석

본 장에서는 스마트카드 자료를 통해 추정한 통근 목적의 OD 자료와 가구통행실태조사자료를 통해 구축한 OD 자료를 비교하고 이에 대한 결과를 다루고 있다. 1절부터 3절에서는 버스, 지하철, 그리고 버스와 지하철을 이용한 환승 통행을 다루고 있으며, 4절에서는 이들을 모두 고려한 대중교통 수단통행을 대상으로 살펴보고 있다. 한편, 5절에서는 스마트카드 자료를 통해 전체수단에 대한 OD 자료를 어느 정도 추정할 수 있는지 확인하였다.

분석결과에 대한 해석은 두 가지 측면에서 이루어진다. 우선, 스마트카드 자료에서 통근통행을 추정하기 위해 본 연구에서 제시한 네 가지 방법이 가구통행실태조사자료의 통행자료를 어느 정도 추정할 수 있는지에 대해 살펴본다. 다음으로, 스마트카드 자료를 활용한 분석에 있어서, 공간적 분석단위에 따라 어떠한 차이가 있는지를 파악한다.

1) 버스 수단 통근목적 OD자료 비교분석

본 절에서는 가구통행실태조사자료 중 버스를 이용한 통근목적의 기종점 자료와 스마트카드 자료 중 버스수단에 대한 자료만을 이용하여 추정한 기종점 자료를 비교분석한다. 스마트카드 자료를 활용한 OD 자료 추정은 통근 추정방법 4가지와 공간단위로 재집계하는 4가지 방식을 모두 고려하여, 총 16가지 방법으로 이루어졌다. 다시 말하자면, 스마트카드 자료를 통해 추정된 16가지의 OD자료를 가구통행실태조사자료의 OD자료와 비교·분석하였으며, 이는 피어슨(Pearson) 상관분석을 이용하여 진행하였다(표 2 참고).

우선, OD 자료의 분석공간단위 측면을 살펴보면,

분석단위의 면적이 증가할수록 더 높은 상관계수를 나타냈다. 행정동을 단위로 한 분석에서는 0.40에서 0.50 사이의 상관계수를 보였으며, 본 연구에서 설정한 생활권을 단위로 한 분석에서는 0.80 정도의 상관계수를 나타냈다. 이는 버스정류장이 대부분 행정동 경계에 위치하여, 행정동을 단위로 분석하였을 때, 그 결과가 다소 왜곡될 수 있음을 의미한다. 한편, 시군구를 단위로 한 경우, 90% 이상의 상관계수를 보이는 것으로 나타났다.

다음으로, 스마트카드 자료 중 통근목적의 통행을 추정하는 방법에 대한 결과를 살펴보면, 그 방법에 따라 상관계수가 0.10까지 차이가 날 수 있음을 확인하였다. 또한, 스마트카드 자료 재집계 시, 분석 공간단위의 면적이 증가할수록, 추정방법 간 상관계수의 차이가 작아지는 것을 파악하였다. 출근시간대를 기준으로 추정한 OD자료는 주중 반복통행을 기준으로 추정한 것에 비해 전반적으로 높은 상관계수를 보이는 것으로 나타났다. 또한, 버스 수단의 경우, 주중 4~5회 반복된 통행보다는 3회 이상 반복된 통행으로 통근목적의 통행을 추정하는 방식이 다소 높은 상관계수를 나타냈다.

표 2. 가구통행실태조사자료와 스마트카드 자료로 추정한 버스 수단 통근목적 OD자료 간 피어슨 상관분석 결과

Table 2. Results of pearson's correlation analysis between bus mode commuting OD matrices estimated by HTS and SC data

| Method ²⁾ \ Spatial unit | PHT | RT_3 | RT_4 | RT_5 |
|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| Admin. dong | 0.510 | 0.506 | 0.473 | 0.401 |
| 5min. living zone | 0.868 | 0.870 | 0.860 | 0.836 |
| 10min. living zone | 0.899 | 0.897 | 0.890 | 0.872 |
| Admin. gu | 0.952 | 0.950 | 0.940 | 0.932 |

Note: All results are statistically significant at the 1% level.

2) 지하철 수단 통근목적 OD자료 비교분석

본 절에서는 지하철 수단을 이용한 통행을 대상으로, 가구통행실태조사자료와 스마트카드 자료를 통해 구축한 통근목적의 OD자료를 비교분석하였다. 앞선 절에서 설명하였듯이, 통근통행 추정방법과 분석의 공간단위를 고려하여, 스마트카드 자료로부터 16가지 OD자료를 추정하였고, 상관분석을 통해 가구통행실태조사자료와 비교하였다(표 3 참고).

우선, 행정동을 공간단위로 한 분석에서는 0.20에서 0.3 정도의 상관계수가 나타났다. 이는 매우 낮은 수치로, 스마트카드 자료 중 지하철 수단을 이용한 통행을 행정동 단위로 재집계하는 것은 다소 부적합할 수 있음을 알 수 있다. 한편, 분석의 공간 단위를 생활권 단위로 하였을 경우, 상관계수가 0.7에서 0.8 사이인 것으로 나타나, 행정동을 단위로 분석하였을 때에 비해 많이 증가한 것으로 확인되었다. 분석의 단위를 시군구로 하였을 경우에는 상관계수가 0.9 이상으로 나타났다.

다음으로, 지하철을 이용한 스마트카드 자료를 통해 통근 목적의 통행을 추정하는 네 가지 방법에 대한 결과를 살펴보면, 그 방법에 따라 근소한 차이가 있는 것으로 나타났다. 지하철수단의 경우, 출

표 3. 가구통행실태조사자료와 스마트카드 자료로 추정한 지하철 수단 통근목적 OD자료 간 피어슨 상관분석 결과

Table 3. Results of pearson's correlation analysis between subway mode commuting OD matrices estimated by HTS and SC data

| Method ²⁾ \ Spatial unit | PHT | RT_3 | RT_4 | RT_5 |
|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| Admin. dong | 0.331 | 0.278 | 0.302 | 0.321 |
| 5min. living zone | 0.761 | 0.726 | 0.751 | 0.766 |
| 10min. living zone | 0.847 | 0.808 | 0.835 | 0.851 |
| Admin. gu | 0.935 | 0.936 | 0.943 | 0.939 |

Note: All results are statistically significant at the 1% level.

퇴근시간을 대상으로 한 추정방법이 전반적으로 높은 상관계수를 나타냈으며, 이는 버스수단을 대상으로 한 분석과 유사한 결과이다.

그러나 지하철수단의 경우, 주중3회 이상 반복된 통행보다는 주중5회 반복된 통행으로 통근목적의 통행을 추정하는 것이 더 높은 상관계수를 나타냈으며, 이는 버스 수단을 대상으로 한 분석과는 다른 결과이다. 이는 다음과 같이 설명될 수 있다. 우선, 지하철역은 424개 행정동 중 210개 행정동에만 위치하고 있어, 행정동을 단위로 OD자료를 구축하는 것은 자료의 왜곡을 발생시킬 수 있다. 뿐만 아니라, 본 연구에서 설정한 151개 5분생활권의 경우에도, 35개 지역에 지하철역이 위치하지 않아, 도시민들의 통행행태를 반영하는 데 한계가 있을 것으로 판단된다. 이처럼, 지하철수단에 대한 스마트카드 자료를 재집계 하는 데 있어서, 공간단위 설정에 어려움이 있으며, 이는 통근목적의 통행을 추정하는 데 영향을 미친다고 볼 수 있다. 실제로, 스마트카드 자료를 이용해 통근통행을 추정하는 데 있어서, 주중5회 반복된 통행보다 주중3회 이상 반복된 통행으로 추정할 때 더 많은 통행량이 반영되기 때문에 이는 결국 자료의 왜곡으로 이어질 수 있다. 예로, 5분생활권을 기준으로 설명하자면, 151개 생활권 중 지하철역이 없는 35개 생활권의 출발통행 또는 도착통행이 0의 값을 가지게 된다. 이러한 측면에서, 주중3회 이상 반복된 통행으로 통근목적 통행을 추정할 때, 나머지 116개 생활권에 대한 출발 및 도착통행이 증가하는 반면에, 35개 생활권에 대한 출발 및 도착통행은 계속해서 0의 값을 가지게 되고, 이는 자료의 왜곡을 발생시킨다.

그럼에도 불구하고, 공간단위를 5분 생활권 또는 이보다 큰 공간단위로 할 때, 추정방법 간 상관계수가 크게 차이나지 않는 것을 알 수 있으며, 10분 생활권과 시군구를 공간단위로 할 때는 그 차이가 각각 0.05와 0.01 미만인 것으로 파악할 수 있다.

3) 환승 수단 통근목적 OD자료 비교분석

이 절에서는 버스와 지하철 수단을 모두 이용한 경우를 대상으로 스마트카드 자료와 가구통행실태 조사자료를 비교분석하였다. 앞서 살펴보았던 것과 마찬가지로 스마트카드 자료를 통해 추정한 16가지의 OD자료와 가구통행실태조사자료를 비교하였으며, 그 결과는 표 4에 제시되어 있다.

표 4에서 볼 수 있듯이, 행정동을 단위로 한 분석에서는 0.12~0.13 정도의 상관계수가 나타났다. 이는 매우 낮은 수치로 행정동을 단위로 한 환승 수단의 통근 통행을 추정하는 데 어려움이 있음을 의미한다. 한편, 5분 및 10분 생활권을 공간단위로 한 분석에서는 0.40~0.50 정도의 상관계수를 보였으며, 시군구를 단위로 분석하였을 때에는 0.60 이상의 상관계수를 나타냈다.

한편, 스마트카드 자료를 활용한 통근 추정방법에 있어서, 주중 4회이상 반복과 3회이상 반복된 통행을 대상으로 한 경우에서 전반적으로 높은 상관계수를 보였다. 출근시간대를 대상으로 통근을 추정한 방법은 전반적으로 낮은 상관계수를 보였으며, 이는 앞서 살펴본 버스와 지하철 수단에 대한 분석 내용과는 다소 차이를 보이는 부분이다.

표 4. 가구통행실태조사자료와 스마트카드 자료로 추정한 버스·지하철 환승 수단 통근목적 OD 자료 간 피어슨 상관분석 결과

Table 4. Results of pearson's correlation analysis between transfer mode commuting OD matrices estimated by HTS and SC data

| Method ²⁾ / Spatial unit | PHT | RT_3 | RT_4 | RT_5 |
|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| Admin. dong | 0.124 | 0.134 | 0.132 | 0.124 |
| 5 min. living zone | 0.395 | 0.419 | 0.423 | 0.413 |
| 10 min. living zone | 0.496 | 0.514 | 0.513 | 0.501 |
| Admin. gu | 0.601 | 0.638 | 0.638 | 0.627 |

Note: All results are statistically significant at the 1% level.

4) 대중교통수단 통근목적 OD자료 비교분석

본 절에서는 앞서 다루었던 버스, 지하철, 그리고 버스와 지하철을 모두 이용한 경우를 모두 포함한 대중교통 전체수단을 다루었다. 이 경우에는 스마트카드 자료 전체를 이용하여 16가지의 방법으로 통근 OD자료를 추정하였으며, 이를 가구통행실태조사자료와 비교분석하였다(표 5 참고).

공간단위의 측면에서 살펴보면, 행정동을 단위로 하였을 때 0.30 정도의 상관계수를 나타냈다. 한편, 5분 생활권을 공간단위로 분석한 결과, 상관계수가 0.70 수준으로 급격하게 증가하였다. 더 나아가, 10분 생활권 또는 시군구를 분석단위로 할 경우에는 상관계수가 0.80 후반 정도까지 증가하는 것으로 파악되었다. 특기할만한 점은, 스마트카드 자료를 활용하여 통근목적의 기종점 자료를 분석하는 데 있어, 최소한 5분 생활권의 공간단위가 되어야 약 0.80 정도의 상관계수를 도출할 수 있다는 것이다.

한편, 통근 목적을 추정하는데 있어서 출근시간대를 통해 추정하는 방법이 전반적으로 높은 상관계수를 보였다. 주중반복통행을 대상으로 분석한 결과, 5회반복통행과 4회이상 반복통행보다는 3회이상 반복통행으로 추정한 OD자료가 가구통행실태조

사자료와 가장 높은 상관계수를 보였다. 더 나아가, 10분생활권 또는 시군구를 공간단위로 하여 분석할 경우, 3회이상 반복통행으로 추정한 OD자료가 출근 시간대를 활용한 방법의 상관계수보다 같거나 큰 것으로 파악되었다.

앞서 살펴보았듯이, 스마트카드 자료를 통해 통근목적의 통행을 추정하는데 있어 행정동보다는 그보다 큰 공간단위가 적합한 것으로 도출되었다. 또한, 통근목적 추정에 있어서 출근시간대 방법이 전반적으로 높은 상관성을 보였으나, 주중 3회이상 반복통행의 경우, 공간단위가 커질수록 출근시간대를 활용한 방법보다 높은 상관계수를 띄었다.

5) 전체수단 통근목적 OD자료 비교분석

이 절에서는 앞선 4절에서 스마트카드 자료로 추정한 대중교통수단 통근목적 OD자료를 전체교통수단에 대하여 추정한 후, 이를 가구통행실태조사자료와 비교분석하였다. 이 과정에서는 가구통행실태조사자료를 통해 파악한 지역 간 대중교통수단분담비율의 역수를 활용하였으며, 스마트카드 자료에서 지역 간 통행이 0의 값을 가지거나, 가구통행실태조사자료에서 지역 간 대중교통 통행이 0의 값을 가진 경우는 제외한 후 분석을 진행하였다.

우선, 행정동을 단위로 한 분석의 경우, 상관계수가 0.10 수준으로 나타나 현저히 낮은 것으로 파악되었다. 이는 대중교통 수단을 대상으로 하였을 때에 비해 더 낮은 수치로, 행정동을 단위로 분석할 경우, 지역 간 대중교통수단분담비율만으로는 전체수단에 대한 통행량을 추정하는 데 한계가 있다고 볼 수 있다. 더 나아가, 5분생활권을 공간단위로 할 경우, 상관계수가 0.10~0.20 수준으로 여전히 매우 낮은 것으로 파악되었다.

한편, 10분생활권을 공간단위로 하여 분석할 경우, 상관계수가 0.70 수준으로 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 시군구를 분석단위로 할 경우에는 추

표 5. 가구통행실태조사자료와 스마트카드 자료로 추정한 대중교통 전체수단 통근목적 OD자료 간 피어슨 상관분석 결과

Table 5. Results of pearson's correlation analysis between transit mode commuting OD matrices estimated by HTS and SC data

| Method ²⁾ Spatial unit | PHT | RT_3 | RT_4 | RT_5 |
|--------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| Admin. dong | 0.396 | 0.337 | 0.323 | 0.307 |
| 5 min. living zone | 0.785 | 0.781 | 0.736 | 0.683 |
| 10 min. living zone | 0.827 | 0.827 | 0.784 | 0.733 |
| Admin. gu | 0.862 | 0.887 | 0.820 | 0.748 |

Note: All results are statistically significant at the 1% level.

표 6. 가구통행실태조사자료와 스마트카드 자료로 추정된 전체 교통수단 통근목적 OD자료 간 피어슨 상관분석 결과

Table 6. Results of pearson's correlation analysis between all modes commuting OD matrices estimated by HTS and SC data

| Spatial unit \ Method ²⁾ | PHT | RT_3 | RT_4 | RT_5 |
|-------------------------------------|---------------------|-------|-------|-------|
| Admin. dong | 0.099 ¹⁾ | 0.187 | 0.164 | 0.140 |
| 5 min. living zone | 0.161 | 0.248 | 0.180 | 0.142 |
| 10 min. living zone | 0.754 | 0.786 | 0.729 | 0.691 |
| Admin. gu | 0.932 | 0.941 | 0.905 | 0.845 |

Note: All results are statistically significant at the 1% level except the cases of 1).

정방법에 따라 상관계수가 0.90 이상으로 증가하였다. 이는 스마트카드 자료를 활용해 지역 간 통근 통행량을 전체수단에 대하여 추정할 때, 공간단위의 설정이 중요하다는 것을 의미하며, 최소한 10분 생활권 단위로 설정해야 상관계수가 높은 결과를 도출할 수 있음을 의미하는 것으로 볼 수 있다.

통근 목적의 통행을 추정하는데 있어서는 앞선 4절에서 살펴본 것과 비슷한 양상이 나타났다. 우선, 출근시간대에 이루어진 통행을 통근의 목적을

가지고 있다고 추정한 방법은 전반적으로 높은 상관계수를 보였다. 반면, 주중반복통행을 기준으로 통근목적의 통행을 추정한 경우, 주중5회 반복통행으로 추정하였을 때는 전반적으로 낮은 상관계수를 보였다. 하지만 주중3회 이상 반복 통행을 통근 통행으로 추정하여, 이를 전체수단 통행량으로 보정해 준 경우에는 네 가지 추정방법 중 가장 높은 상관계수를 보이는 것으로 나타났다. 정리하자면, 통행의 시간대를 기준으로 통근의 목적을 추정할 경우, 전반적으로 높은 상관계수를 도출할 수 있고, 주중에 반복되는 통행을 대상으로 할 경우, 5회 반복된 통행보다는 3회 이상 반복된 통행으로 추정하는 것이 더 적합한 것으로 확인되었다.

6) 소결

앞선 과정에서 스마트카드 자료 중 통근의 목적으로 이루어진 통행을 추정하고, 이를 가구통행실태조사자료와 비교하는 과정을 거쳤다. 더 나아가, 교통수단, 분석공간단위, 그리고 통근 추정방법의 측면에서 분석을 진행하였으며, 이를 통해 스마트카드 자료 활용 시 적합한 분석공간단위 및 통근 추정방법을 도출하고자 하였다. 그림 5와 6은 대중교통수

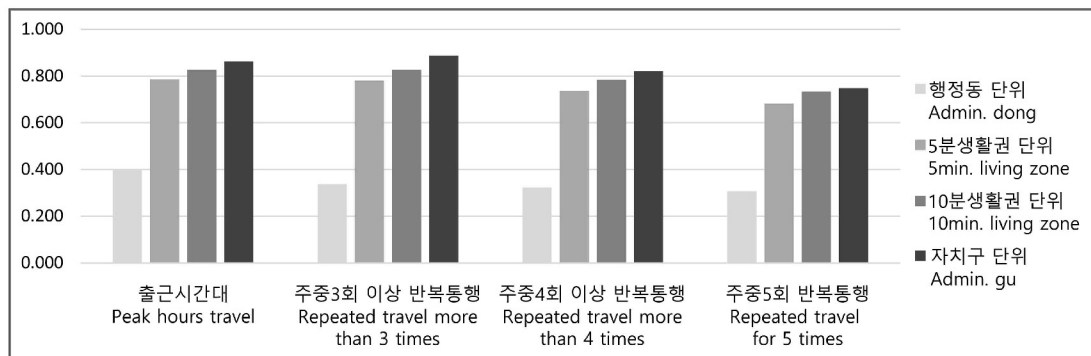


그림 5. 스마트카드 자료와 가구통행실태조사자료로 추정된 통근목적 OD자료 간 피어슨 상관분석 결과 (대중교통 수단)
Figure 5. Results of pearson's correlation analysis between transit mode commuting OD matrices estimated by HTS data and SC data

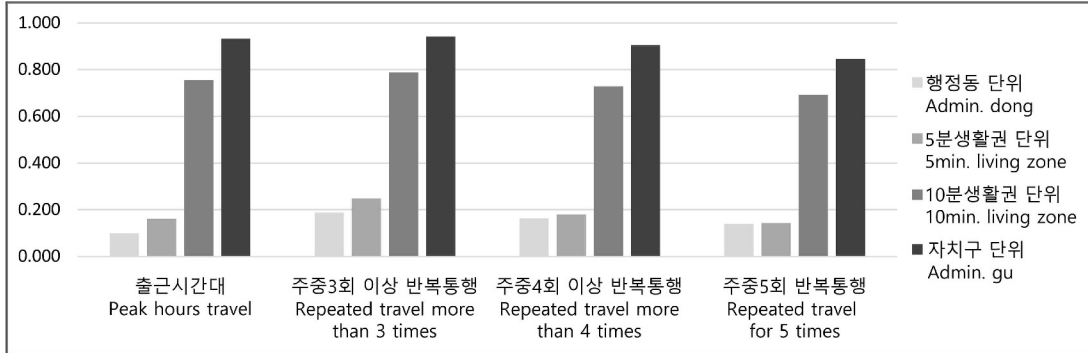


그림 6. 스마트카드 자료와 가구통행실태조사자료로 추정된 통근목적 OD자료 간 피어슨 상관분석 결과 (전체 교통수단)
 Figure 6. Results of pearson's correlation analysis between all modes commuting OD matrices estimated by HTS data and SC data

단과 전체수단에 대하여 스마트카드 자료와 가구통행실태조사자료를 비교한 결과를 요약하고 있다.

우선, 버스, 지하철, 그리고 버스와 지하철을 모두 이용한 통행에 대한 분석결과를 살펴보면, 스마트카드 자료를 이용한 기중점통행량 추정에 있어서, 버스수단은 0.40~0.95, 지하철수단은 0.28~0.94, 환승수단은 0.12~0.64의 상관계수 수준으로 추정할 수 있는 것으로 나타났다. 분석의 공간단위에 따라 상관계수는 큰 폭으로 차이를 보였으며, 스마트카드 자료의 재집계 과정에 이용된 공간단위가 클수록 전반적으로 높은 상관관계를 보였다.

다음으로, 스마트카드 자료를 이용해 대중교통수단의 통근목적 통행을 추정하여, 이를 가구통행실태조사자료와 비교한 결과, 0.31에서 0.89 수준의 상관계수를 도출할 수 있었다(그림 5 참고). 그림 5에서 볼 수 있듯이, 분석의 공간단위를 행정동으로 하였을 경우, 상당히 낮은 상관계수를 보였다. 한편, 공간단위를 5분생활권 또는 이보다 크게 할 경우, 상관계수가 급격히 상승하는 결과를 보였으며, 10분생활권 혹은 시군구를 분석의 공간단위로 한 분석에서는 80% 수준의 상관성을 나타냈다.

한편, 스마트카드 자료 중 통근 통행 추정방법에

따른 상관계수 차이는 다음과 같이 요약할 수 있다 (그림 5 참고). 우선, 출근시간대에 이루어진 통행을 통근의 목적을 가지고 있다고 추정한 경우, 전반적으로 높은 상관계수를 보였다. 한편, 사용자 ID 별로 출발지와 도착지가 동일한 통행이 주중에 반복된 횟수를 기준으로 통근 목적의 통행을 추정한 경우, 5회 반복 또는 4회 이상 반복된 통행을 대상으로 하였을 때보다 3회 이상 반복된 통행이 통근의 목적을 가지고 있다고 추정한 방법이 가장 높은 상관계수를 보였다. 여기서 출근시간대를 활용한 방법과 주중3회 이상 반복된 통행을 이용한 방법을 비교해보면, 행정동 및 5분생활권에서는 출근시간대를 활용한 방법의 상관계수가 매우 미세하게 높게 도출된 반면, 10분생활권 및 시군구를 공간단위로 하였을 경우, 주중3회 이상 반복된 통행을 활용한 방법이 미세한 수준에서 높게 나타났다.

마지막으로, 스마트카드 자료로 추정한 전체수단의 통근목적 통행과 가구통행실태조사자료의 통행량을 비교한 결과, 0.01에서 0.94 수준의 상관계수를 나타냈다(그림 6 참고). 분석의 공간단위 측면에서 살펴보면, 행정동과 5분생활권을 단위로 분석을 시행한 경우, 0.01에서 0.25 사이의 매우 낮은 상관

계수를 보였다. 한편, 공간단위를 10분생활권으로 한 경우, 상관계수가 약 0.70 수준으로 확인되었으며, 시군구를 공간단위로 할 경우 상관계수가 0.9 이상까지 증가하였다. 이는 스마트카드 자료로 파악한 지역 간 대중교통 통행량을 가구통행실태조사자료의 지역 간 대중교통수단분담비율의 역수로 보정해줄 때, 최소한 10분생활권의 공간단위를 활용하여 의미 있는 결과를 도출할 수 있음을 의미한다.

한편, 스마트카드 자료로부터 통근 목적의 통행을 추정하는 방법에 따른 상관계수를 살펴보면, 출근시간대를 활용한 방법이 전반적으로 높은 상관계수를 나타냈다(그림 6 참고). 하지만, 사용자ID별로 주중에 반복된 통행 횟수를 바탕으로 통근 목적의 통행을 추정한 결과, 주중3회 이상 반복된 통행을 활용한 방법이 가장 높은 상관계수를 보였으며, 더 나아가 출근시간대를 활용한 방법보다 높은 상관계수를 나타냈다.

위의 결과를 정리하면 다음과 같다. 첫째, 분석공간단위의 측면에서, 최소한 5분생활권의 공간단위를 적용하여 스마트카드 자료를 재집계하여야 가구통행실태조사자료 중 대중교통을 이용한 통행량 자료와의 상관성을 80% 수준으로 확보할 수 있다. 또한, 스마트카드 자료로 전체수단에 대한 기종점 자료를 추정할 경우, 최소한 10분생활권의 공간 단위를 적용함으로써 70% 정도의 상관계수를 확보할 수 있었다.

둘째, 스마트카드 자료로부터 통근 목적의 통행을 추정하는 데 있어, 출근시간대에 이루어진 통행 또는 주중3회 이상 반복된 통행을 활용하여야 높은 수준의 상관관계를 확보할 수 있었다. 또한, '출근시간대' 방법과 '주중3회이상반복통행' 방법의 추정 결과는 큰 차이를 보이지 않았으나, 대중교통 수단과 전체수단에 대한 통행량을 가구통행실태조사자료와 비교한 결과 '주중3회이상반복통행'을 활용한 방법이 더 적합한 것으로 확인되었다.

2. 자료별 위세중심성 지수 비교분석

마지막 분석과정으로, 앞서 구축한 자료별 기종점 통행량을 이용하여 네트워크분석 지표 중 통근네트워크 구조 또는 도시의 공간구조 분석 시 주로 활용되는 위세중심성(prestige centrality) 지수를 산출하였다. 가구통행실태조사자료와 스마트카드 자료를 이용하여 산출된 네트워크 구조에 대한 지수를 비교함으로써, 향후 스마트카드 자료를 활용한 통근네트워크 구조에 대한 분석, 더 나아가 도시의 공간구조 분석이 가능한지를 검토하였다.

기존 연구에서는 위세중심성뿐만 아니라, 연결중심성(degree centrality) 지수를 활용하여 도시의 구조를 살펴보고 있다. 하지만, 연결중심성의 경우 주변 지역과 연결된 정도만을 산출하여 네트워크 구조에서의 위계, 더 나아가 도시의 공간구조 상에서 나타나는 지역별 위계를 충분히 다루지 못해 본 연구에서는 이를 다루지 않았다.

한편, 위세중심성 지수는 통근 네트워크의 구조에서 위계가 높은 결절점을 살펴볼 때 이용하는 값으로써, 결절점의 연결중심성과 주변 결절점과의 통행량을 동시에 고려하여 산출된다는 특징이 있다. 위세중심성의 경우, 그 값 자체보다는 지역 간 위세중심성 값의 순위가 중요하다고 판단하여 스피어만(Spearman) 상관분석을 통한 비교분석이 적합하다고 판단하였다.

통근네트워크의 구조 또는 도시공간구조를 다루고 있는 기존 연구에서는 위세중심성 지수에 주로 집중하고 있다. 그러나 기존에는 4년 혹은 5년마다 조사되는 자료를 이용해야 했기 때문에 분석의 시간적 범위 측면에서 제약이 있다. 따라서 향후에 스마트카드 자료를 활용한 지역별 위세중심성의 산출 및 도시구조에 대한 분석은 시간적 제약 없이 분석을 시행할 수 있다는 점에서 잠재력이 크다.

표7과 8은 스마트카드 자료와 가구통행실태조사

자료를 이용하여 구축한 통근목적의 통행네트워크에 대한 결절점별 위세중심성을 상관분석을 통해 비교한 결과이다. 표 7은 대중교통수단을, 표 8은 전체수단에 대한 분석결과를 나타내고 있다.

우선, 분석의 공간단위 측면에서 분석결과를 살펴보면 전반적으로 공간단위 커질수록 상관계수가 높게 나타났다. 행정동을 공간단위로 한 분석의 경우, 대중교통 수단 통행만을 이용하였을 때는 0.40 정도의 상관계수가 나타났으며, 전체수단을 이용했을 때는 0.50 정도의 상관계수를 보였다. 분석의 공간단위를 생활권으로 한 경우, 대중교통 수단통행의 네트워크에서는 0.90 수준의, 전체수단에 대한 통행 네트워크에서는 0.80~0.90 정도의 상관계수를 보였다. 더 나아가, 시군구를 분석의 공간단위로 하였을 때는 상관계수가 1.0 으로 나타났다. 이는 스마트카드 자료를 이용하여 통행네트워크의 구조를 분석하는 데 있어서, 5분 생활권 이상의 공간단위를 이용함으로써 0.80 이상의 상관계수로 위세중심성을 도출할 수 있다는 점에서 의의가 있다.

한편, 스마트카드 자료 활용 시, 통근 목적통행 추정방법에 따른 분석결과와 차이를 살펴보면, 앞서 다루었던 OD자료 비교 내용과 유사함을 알 수 있다. 스마트카드 자료 중, 출근시간대에 이루어진 통행을 대상으로 통근 목적의 통행을 추정하여, 이에 대한 위세중심성 지수를 산출한 결과, 전반적으로 높은 상관계수를 보였다. 또한, 스마트카드 자료 중, 주중3회 이상 반복된 통행으로 통근의 목적통행을 추정한 경우, 주중 4~5회 반복된 통행보다 높은 상관계수를 나타냈다. 더 나아가, 통근 목적통행 추정방법에 있어서, 출근시간대와 주중 3회이상 반복된 통행을 대상으로 한 경우, 상관계수가 크게 차이를 보이지는 않았다.

본 연구에서 구축한 통근통행 기종점 자료를 이용해 위세중심성을 산출하고, 상관분석을 통해 이를 비교해본 결과, 앞서 살펴본 통근통행 기종점 자료

에 대한 분석결과보다 상관계수가 높음을 알 수 있다. 이는 위세중심성 지수가 단순히 지역 간 통행량을 반영하기보다는 주변 지역 간 통행량 규모와의 상대적인 개념을 이용하기 때문인 것으로 판단된다. 결과적으로, 실제 통근통행량 OD자료의 값이 차이를 보이더라도, 위세중심성 지수는 큰 차이를 보이지 않는 것으로 생각해볼 수 있다.

위 분석과정을 통해, 스마트카드 자료로 산출한 위세중심성 지수의 순위가 가구통행실태조사자료를

표 7. 가구통행실태조사자료 및 스마트카드 자료 기반 위세중심성 지수 간 스피어만 상관분석 결과 (대중교통 수단 통근통행)

Table 7. Results of spearman's correlation analysis between prestige centrality index estimated by HTS data and SC data (Based on transit mode commuting OD matrices)

| Spatial unit \ Method ²⁾ | PHT | RT_3 | RT_4 | RT_5 |
|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| Admin. dong | 0.459 | 0.418 | 0.385 | 0.358 |
| 5 min. living zone | 0.901 | 0.891 | 0.878 | 0.858 |
| 10 min. living zone | 0.915 | 0.909 | 0.899 | 0.889 |
| Admin. gu | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |

Note: All results are statistically significant at the 1% level.

표 8. 가구통행실태조사자료 및 스마트카드 자료 기반 위세중심성 지수 간 스피어만 상관분석 결과 (전체 교통수단 통근통행)

Table 8. Results of spearman's correlation analysis between prestige centrality index estimated by HTS data and SC data (Based on all modes commuting OD matrices)

| Spatial unit \ Method ²⁾ | PHT | RT_3 | RT_4 | RT_5 |
|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| Admin. dong | 0.476 | 0.468 | 0.461 | 0.490 |
| 5min. living zone | 0.793 | 0.801 | 0.806 | 0.806 |
| 10min. living zone | 0.899 | 0.896 | 0.888 | 0.880 |
| Admin. gu | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |

Note: All results are statistically significant at the 1% level.

활용하여 산출한 것과 큰 차이를 보이지 않는 것으로 파악되어, 스마트카드 자료를 활용한 통근 네트워크 분석이 가능하다는 것을 확인할 수 있었다. 더 나아가, 위세중심성 지수를 비교한 경우에도, 행정동보다는 생활권을 분석의 공간단위로 하였을 때 상관계수가 높게 도출됨을 알 수 있었다.

V. 결론

본 연구는 스마트카드 자료를 이용하여, 도시민들의 통근통행 패턴을 추정하고, 통근네트워크의 구조를 분석하였다. 그리고 이를 가구통행실태조사자료의 결과와 비교·분석함으로써 스마트카드 자료의 활용가능성을 살펴보았다. 뿐만 아니라, 대중교통수단에 대한 스마트카드 기록만으로 전체수단에 대한 통행을 추정할 수 있는지 확인하였으며, 스마트카드 자료를 재집계하는 데 있어 적절한 공간단위를 논의하였다. 본 연구의 결과는 다음과 같다.

첫째, 본 연구는 스마트카드 자료에 기록된 다양한 목적의 통행 중 통근목적의 통행을 추정하는 방법을 네 가지 제안하고, 이 중 어느 방법을 이용했을 때 가구통행실태조사자료의 결과값과 높은 상관계수를 보이는지 도출하였다. 그 결과, 출근시간대에 이루어진 통행이 통근의 목적을 가지고 있다고 추정한 방법 및 주중 3회 이상 반복된 통행을 통근통행으로 추정하는 방법이 가장 높은 상관계수를 보였다. 우선, 행정동과 5분생활권을 공간단위로 하였을 때 출근시간대에 이루어진 통행을 통근의 목적을 가지고 있다고 한 방법이 가장 높은 상관계수를 보였다. 그러나 대중교통 수단의 통근목적 통행을 10분생활권 및 시군구를 공간단위로 분석한 경우와 전체수단의 통근목적 통행을 추정한 경우에서 주중 3회 이상 반복된 통행을 통근통행으로 추정하는 방법이 가장 높은 상관성을 보였다. 이에 따라 스마트카드 자료를 이용한 통근통행 추정에 있어,

주중 3회 이상 반복된 통행이 통근의 목적을 가질 것이라고 추정하는 방법을 이용함으로써 가장 높은 정확성을 확보할 수 있다고 볼 수 있다.

둘째, 스마트카드 자료를 활용하여 통근통행패턴을 추정하고 통근네트워크의 구조를 분석하는 데 있어서 적합한 공간단위를 살펴보았다. 가구통행실태조사자료의 경우, 최소집계단위가 행정동으로 이루어져 있지만, 스마트카드 자료의 경우 최소집계단위가 버스정류장 및 지하철역으로 구성되어 있어 자료를 재집계하여 활용할 필요성이 있다. 본 연구에서는 스마트카드 자료를 행정동, 5분생활권, 10분생활권, 시군구의 공간단위를 이용하여 재집계하였으며, 이를 가구통행실태조사자료와 비교분석하였다. 그 결과, 행정동을 단위로 하여 스마트카드 자료를 분석하기에는 한계가 있었으며, 이는 대부분의 버스정류장 및 지하철역이 행정동의 경계에 위치해 있고, 특히 지하철역의 경우 서울시 424개 행정동 중 210개 행정동에만 위치하기 때문으로 설명할 수 있다. 연구의 결과에 따르면, 스마트카드 자료를 재집계하는 공간단위가 커질수록 가구통행실태조사자료와 높은 상관성을 보이는 것으로 나타났다. 이는 스마트카드 자료를 활용하여 통행패턴을 분석하는데 한계점으로 작용할 수 있을 것으로 판단된다.

마지막으로, 본 연구에서는 스마트카드 자료로 구축한 통근네트워크를 대상으로 각 결절점의 위세중심성 지수를 산출하고, 이를 가구통행실태조사자료의 결과와 비교하였다. 5분생활권 규모 이상의 공간 단위를 이용할 경우, 80~90% 수준의 상관성을 보였으며, 이를 통해 스마트카드 자료를 활용한 통근네트워크 구조 분석이 가능할 것을 시사하였다.

기존에 도시민들의 통행패턴을 파악하고자 활용된 가구통행실태조사자료는 4~5년마다 조사가 이루어지기 때문에, 도시민들의 통행행태나 통근네트워크를 분석하는 데 있어서 분석의 시간적 범위에 제약이 따른다. 하지만, 가구통행실태조사자료의 지역

간 통행수단분담비율을 이용해 스마트카드 자료를 보정함으로써 어느 시기이든 도시민들의 통행행태와 통근네트워크 구조에 대한 분석이 가능할 것으로 보인다. 이를 통해, 도시민들의 통행패턴을 주기적으로 모니터링하고, 더 나아가 다양한 도시정책이 미치는 영향을 파악할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구는 데이터 구득의 한계로, 분석의 공간적 범위를 서울시로 한정하고, 한 주 간의 통행기록만을 살펴보았다는 점에서 한계를 가진다. 그럼에도 불구하고, 본 연구는 스마트카드 자료를 활용하여 통근패턴 및 통근 네트워크의 구조를 분석하고, 이를 가구통행실태조사자료와 비교함으로써 스마트카드 자료의 활용가능성을 다루었다는 점에서 의의가 있다. 향후에는 스마트카드 자료를 이용하여 통근 목적 이외의 통행을 추정하거나 더 많은 시점에 대한 스마트카드 자료를 이용하여 도시민들의 통행패턴 및 통근네트워크 구조의 변화를 관찰하는 시도가 이루어질 필요가 있을 것으로 판단된다.

- 주1. 네트워크 분석방법 중 하나인 Community Detection은 하나의 네트워크 구조에서 응집력이 강한 지역을 분석하여, 네트워크 구조에서 몇 개의 커뮤니티를 추출하는 방법이다. 네트워크 구조에서 커뮤니티를 추출하는 방법론은 그간 다양하게 제시되어 왔으며, 최근에는 연결점 간에 가중치와 방향성이 있는 네트워크에서 Community Detection을 효율적으로 시행할 수 있는 방법들이 연구되었다. Lancichinetti & Fortunato(2009)는 가중치와 방향성이 있는 네트워크의 경우, 다양한 Community Detection 방법 중 Infomap 기능을 이용하는 것이 가장 적합함을 보고하였다. 이와 관련해, Zhong et al.(2014)은 Infomap 기능을 활용해 싱가포르의 스마트카드 자료를 대상으로 Community Detection을 시행하였다. 본 연구에서는 R 3.1.3의 igraph패키지 중 infomap.community 기능을 활용하여 Community Detection을 시행하였으며, 이 과정에서 5분 및 10분 이내에 이루어진 도보통행 네트워크 자료를 이용하였다.
- 주2. 표 2부터 표 8에 제시되어 있는 추정방법인 PHT, RT_3, RT_4, RT_5 에 대한 구체적인 내용은 p.7에 제시되어 있으며, 각 약어는 다음을 의미함.
 PHT : 출근시간대 발생 통행 (peak hours travel)
 RT_3 : 주중 3회 이상 반복 통행 (repeated travel more than 3 times during weekdays)

- RT_4 : 주중 4회 이상 반복 통행 (repeated travel more than 4 times during weekdays)
 RT_5 : 주중 5회 반복된 통행 (repeated travel for 5 times during weekdays)

인용문헌

References

1. 김관호·오규협·이영규·정재윤, 2013. "스마트카드 빅 데이터를 이용한 서울시 지하철 이동패턴 분석", 『한국전자거래학회지』 18(3): 211-222.
 Kim, K., Oh, K., Lee, Y. K., & Jung, J. Y., 2013. "Discovery of Travel Paterns in Seoul Metropolitan Subway Using Big Data of Smart Card Transaction Systems", *The Journal of Society for e-Business Studies*, 18(3): 211-222.
2. 김보현·장성만·이승일, 2013. "도시 유형별 교통에너지 소비에 영향을 미치는 요인 연구: 통행패턴과 개발밀도에 따른 도시유형 구분을 기초로", 『국토계획』 48(3): 129-148.
 Kim, B. H., Jang, S. M., & Lee, S., 2013. "A Study on the Influencing Factors on Transport Energy Consumption by City Types: On the Basis of City Types Classified by Travel Pattern and Urban Density", *Journal of Korea Planning Association*, 48(3): 129-148.
3. 김순관·박준환·조종석, 2007. 「교통카드 데이터를 활용한 OD 추정 및 활용」, 서울: 서울시정개발연구원
 Kim, S. K., Park, J. H., Cho, C. S., 2007, *The Estimation and Application of Origin-Destination Tables by Using Smart Card Data*, Seoul: Seoul Development Institute.
4. 김순관, 2015. "교통카드 데이터 활용도 제고방안", 『국토』 405: 18-24.
 Kim, S. K., 2015. "Plans for Raising the Utilization of Smart Card Data", *KRIHS Monthly Magazine*, 405: 18-24.
5. 김지윤·임수연·추상호·박인기, 2015. "서울시 대중교통 이용 패턴 및 영향요인 분석 연구", 『국토연구』 87: 49-65.
 Kim, J., Lim, S., Choo, S., & Park, I., 2015.

- "Analysis of Transit Ridership Patterns and Influencing Factors in Seoul", *The Korea Spatial Planning Review*, 87: 49-65.
6. 김호성·박종수·이금숙, 2010. "서울 수도권 지하철 교통망 승객 흐름의 시각화", 『한국콘텐츠학회논문지』 10(4): 397-405.
Kim, H. S., Park, J. S., & Lee, K., 2010. "Visualization of Passenger Flows of the Metropolitan Seoul Subway System", *The Journal of the Korea Contents Association*, 10(4): 397-405.
 7. 박경철·좌승희, 2009. 「기종점 통행량을 활용한 수도권 공간구조 변화 분석」, 경기: 경기개발연구원 기본연구.
Park, G. C., & Zwa, S. H., 2009. *A Study on the Spatial Structure of the Seoul Metropolitan Area Using O/D Trips*, Gyeonggi: Gyeonggi Research Institute.
 8. 박진영·김동준, 2007. "서울시 교통카드자료의 특성 및 신뢰성 분석", 『서울도시연구』, 8(4): 127-138.
Park, J. Y., & Kim, D. J., 2007. "Analysis of Characteristics and Reliability of Smart Card Data in Metropolitan Seoul", *Seoul Studies*, 8(4): 127-138.
 9. 빈미영·이수진·정의석, 2011. 「경기도 교통카드자료를 이용한 통행패턴 분석과 활용방안 연구」, 경기: 경기개발연구원 정책연구 2011-58.
Bin, M. Y., Lee, S., & Jung, E. S., 2011. *A Study on Analysis Travel Patterns and Applications Using Gyeonggi-Do Traffic Card Data*, Gyeonggi: Gyeonggi Research Institute.
 10. 성현곤·김동준·박지형, 2008. "서울시 역세권에서의 토지이용 및 도시설계특성이 대중교통이용증대에 미치는 영향 분석", 『대한교통학회지』, 26(4): 135-147.
Sung, H. G., Kim, D. J., & Park, J. H., 2008. "Impacts of Land Use and Urban Design Characteristics on Transit Ridership in the Seoul Rail Station Areas", *Journal of Korean Society of Transportation*, 26(4): 135-147.
 11. 손승호, 2014. "수도권의 직주균형과 통근통행의 변화: 2015-2010년", 『대한지리학회지』, 49(3): 390-404.
Son, S., 2014. "The Changes of Job-Housing Balance and Commuting Trip in Seoul Metropolitan Area: 2005-2010", *Journal of the Korean Geographical Society*, 49(3): 390-404.
 12. 송미령, 1998. "서울대도시권의 도시공간구조와 초과통근", 『국토계획』, 33(1): 57-75.
Song, M. R., 1998. "Urban Spatial Structure and Excess Commuting in the Seoul Metropolitan Area", *Journal of Korea Planning Association*, 33(1): 57-75.
 13. 신임호·이주형, 2012. "서울시 지하철 유동인구 이동패턴 분석을 통한 중심지역 및 특성 분석", 『디자인융복합연구』, 33: 43-55.
Shin, I. H., & Lee, J. H., 2012. "An Analysis on the Central Region and Characteristics by Analysis of Subway Passenger's Travel Pattern in Seoul", *Design Convergence Study*, 33: 43-55.
 14. 이삼수, 2004. "직주 재배치를 통한 서울대도시권 통근통행의 효율성 분석", 『국토계획』, 39(3): 95-109.
Lee, S. S., 2004. "Analysis on the Commuting Efficiency of Urban Structure by the Job-housing Assignment in Seoul Metropolitan Area", *Journal of Korea Planning Association*, 39(3): 95-109.
 15. 이수기·주미진·하재현, 2015. "수도권 1기 신도시 통근통행특성과 공간구조의 변화 (1996-2010): 자족성과 중심성 분석을 중심으로", 『국토계획』, 50(5): 5-23.
Lee, S., Joo, M., & Ha, J., 2015. "An Analysis of Changes in Commuting Characteristics and Urban Spatial Structure of the First Generation New Towns in the Seoul Metropolitan Area (1996-2010): Focused on Self-Containment and Centrality", *Journal of Korea Planning Association*, 50(5): 5-23.
 16. 이정우·고주연·전상우·전철민, 2015. "대중교통 승하차 수요분석을 통한 서울시 역세권 유형화 및 토지이용 특성 연구", 『국토연구』, 84: 35-53.
Lee, J., Go, J. Y., Jeon, S., & Jun, C., 2015. "A Study of Land Use Characteristics by Types of

- Subway Station Areas in Seoul Analyzing Patterns of Transit Ridership”, *The Korea Spatial Planning Review*, 84: 35-53.
17. 이희연·김홍주, 2006a. “네트워크 분석을 통한 수도권 공간구조 변화 1980-2000년”, 「국토계획」, 41(1): 133-151.
 - Lee, H. Y., & Kim, H. J., 2006a. “The Transformation of the Spatial Structure by Commuting Flows in the Capital Region Using Network Analysis, 1980-2000”, *Journal of Korea Planning Association*, 41(1): 133-151.
 18. 이희연·김홍주, 2006b. “서울대도시권의 통근 네트워크 구조 분석”, 「한국도시지리학회지」, 9(1): 91-111.
 - Lee, H. Y., & Kim, H. J., 2006b. “The Analysis of the Structure of Commuting Network in Seoul Metropolitan Area”, *Journal of the Korean Urban Geographical Society*, 9(1): 91-111.
 19. 이희연·이승민, 2008. “수도권 신도시 개발이 인구이동과 통근통행패턴에 미친 영향”, 「대한지리학회지」, 43(4): 561-579.
 - Lee, H. Y., & Lee, S. M., 2008. “The Influence of New Town Development on the Changes of the Migration and Commuting Patterns in the Capital Region”, *Journal of the Korean Geographical Society*, 43(4): 561-579.
 20. 전명진, 1995. “직주불일치 현상과 낭비통근: 서울시를 중심으로”, 「대한교통학회지」, 13(3): 5-17.
 - Jun, M. J., 1995. “Jobs-Housing Mismatch and Wasteful Commuting in Seoul”, *Journal of Korean Society of Transportation*, 13(3): 5-17.
 21. 정윤영·문태현, 2014. “유동인구 자료를 이용한 서울시 도시공간구조 분석 연구: ‘2030 서울플랜’과 비교 연구”, 「한국지역개발학회지」, 26(3): 139-158.
 - Jeong, Y. Y., & Moon, T. H., 2014. “Analysis of Seoul Urban Spatial Structure Using Pedestrian Flow Data - Comparative Study with ‘2030 Seoul Plan’”, *Journal of the Korean Regional Development Association*, 26(3): 139-158.
 22. 최은진·허희범·성현곤·김응철, 2010. “수도권의 난개발지수 산정 및 통행패턴과의 연관성 분석”, 「국토연구」 64: 97-112.
 - Choi, E., Heo, H., Sung, H., & Kim, E., 2010. “A Study on the Estimation of Sprawl Index and its Relationship with Travel Pattern in the Capital Region”, *The Korea Spatial Planning Review*, 64: 97-112.
 23. 한상욱·강희용·이명훈, 2015. “교통카드 데이터를 활용한 주요 역세권별 대중교통 이용 통근통행자의 주거지 분포: 수도권을 대상으로”, 「국토계획」, 50(4): 103-117.
 - Han, S. U., Kang, H. Y., & Lee, M. H., 2015. “Residential Distribution of Public Transport Commuter by Smart Card through the Use of the Major Subway Influence Area - Focus on Metropolitan”, *Journal of Korea Planning Association*, 50(4): 103-117.
 24. Ayeni, B., 1979. *Concepts and Techniques in Urban Analysis*, London: Croom Helm.
 25. Bagchi, M. and White, P. R., 2005. “The Potential of Public Transport Smart Card Data”, *Transport Policy*, 12(5): 464-474.
 26. Calabrese, F., Diao, M., Di Lorenzo, G., Ferreira, J., & Ratti, C., 2013. “Understanding Individual Mobility Patterns from Urban Sensing Data: A Mobile Phone Trace Example”, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 26: 301-313.
 27. Diao, M., Zhu, Y., Ferreira, J., & Ratti, C., 2015. “Inferring individual daily activities from mobile phone traces: A Boston example”, *Environment and Planning B: Planning and Design*, doi: 10.1177/0265813515600896.
 28. Hughes, H. L., 1993. “Metropolitan Structure and the Suburban Hierarchy”, *American Sociological Review*, 58: 417-433.
 29. Irwin, M. & Hughes, H. L., 1992. “Centrality and the Structure of Urban Interaction: Measures, Concepts, and Application”, *Social Forces*, 71(1): 17-51.
 30. Lancichinetti, A., & Fortunato, S., 2009. “Community Detection Algorithms: A Comparative

- Analysis”, *Physical Review E*, 80(5): 056117. doi: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.80.056117>.
31. Lee, S. & Hickman, M. D., 2011. “Travel Pattern Analysis using Smart Card Data of Regular Users”, Paper presented at the 90th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC: Marriott Wardman Park, Omni Shoreham, and Hilton Washington.
 32. Long, Y., & Thill, J. C., 2015. “Combining Smart Card Data and Household Travel Survey to Analyze Jobs–Housing Relationships in Beijing”, *Computers, Environment and Urban Systems*, 53: 19–35.
 33. Long, Y., Zhang, Y., & Cui, C. Y., 2012. “Identifying Commuting Pattern of Beijing using Bus Smart Card Data”, *Acta Geographica Sinica*, 67(10): 1339–1352.
 34. Ma, X., Wu, Y. J., Wang, Y., Chen, F., & Liu, J., 2013. “Mining Smart Card Data for Transit Riders’ Travel Patterns”, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 36: 1–12.
 35. Newman, M. E., 2006. “Modularity and Community Structure in Networks”, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 103(23): 8577–8582. doi: [10.1073/pnas.0601602103](https://doi.org/10.1073/pnas.0601602103).
 36. Park, J., Kim, D. J., & Lim, Y., 2008. “Use of Smart Card Data to define Public Transit Use in Seoul, South Korea”, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2063: 3–9.
 37. Pelletier, M. P., Trépanier, M., & Morency, C., 2011. “Smart Card Data use in Public Transit: A Literature Review”, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 19(4): 557–568.
 38. Peng, Z. R., 1997. “The Jobs–Housing Balance and Urban Commuting”, *Urban Studies*, 34(8): 1215–1235.
 39. Scott, D. M., Kanaroglou, P. S., & Anderson, W. P., 1997. “Impacts of Commuting Efficiency on Congestion and Emissions: Case of The Hamilton CMA, Canada”, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2(4): 245–257.
 40. Trepanier, M., Morency, C., & Blanchette, C., 2009. “Enhancing Household Travel Surveys using Smart Card Data”, Paper presented at the 88th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC: Marriott Wardman Park, Omni Shoreham, and Hilton Washington.
 41. Zhong, C., Arisona, S. M., Huang, X., Batty, M., & Schmitt, G., 2014. “Detecting the Dynamics of Urban Structure through Spatial Network Analysis”, *International Journal of Geographical Information Science*, 28(11): 2178–2199.

| | |
|----------------------------|------------|
| Date Received | 2015-10-10 |
| Reviewed(1 st) | 2016-01-29 |
| Date Revised | 2016-03-18 |
| Reviewed(2 nd) | 2016-04-07 |
| Date Accepted | 2016-04-07 |
| Final Received | 2016-04-29 |