

우리나라 대도시권 통근 효율성 비교 : MAUP 회피를 위한 Constrained Monte-Carlo Simulation의 활용*

Commuting Efficiency Comparison of Metropolitan Areas in South Korea : Application of Constrained Monte-Carlo Simulation to Avoid the MAUP

윤현성** · 김승남***

Hyunseong Yun** · Seung-Nam Kim***

Abstract

To evaluate the efficiency of commuting patterns, various commuting indicators such as excess commute and commuting potential utilized have been developed and used. It is crucial to calculate these indicators reasonably to reveal the differences in commuting patterns among metropolitan areas and to consider these in the process of formulating commuting policies. However, commuting indicators are generally calculated at the administrative district level, and thus, they are not free from the problem of the modifiable areal unit problem (MAUP). This issue can undermine the rationality of comparing commuting efficiency between metropolitan areas, making it necessary to handle the calculation of commuting indicators carefully. Therefore, this study utilises Monte Carlo Simulation to calculate optimal, actual, and maximum commuting distances, and thereby presents the excess commute and the commuting potential utilized. To apply Monte Carlo Simulation to the context of South Korea, a constrained Monte Carlo Simulation is conducted, where residential and workplace locations used in the simulation are selected based on the actual locations of buildings. The analysis is conducted on 13 metropolitan areas with established metropolitan plans using the 2016 Household Travel Survey data. The commuting indicators calculated through the simulation showed minimal differences compared to the results obtained through conventional methods. The comparison of commuting efficiency among metropolitan areas revealed that even if the degree of spafial balance between residential and workplace locations is similar, the actual commuting patterns can differ significantly. It is suggested that further research considering characteristics such as the area of each metropolitan region will be necessary in the future.

Keywords: Metropolitan Area, Commuting Efficiency, MAUP, Constrained Monte-Carlo Simulation

*이 논문은 2019년 대한민국 교육부와 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구이며(NRF-2019S1A5A8036584), 대한국토·도시계획학회 2023년 추계학술대회 우수논문상 수상작을 수정·보완하여 작성하였다.

**중앙대학교 스마트시티학과 박사과정(주저자: kkum456@cau.ac.kr)

***중앙대학교 사회기반시스템공학부 부교수(교신저자: snkim@cau.ac.kr)

1. 서론

급속한 경제 발전과 인구 증가, 도시의 외연적 확산으로 전 세계의 통근 통행량과 이로 인한 사회적 비용은 지속적으로 증가해 왔다(Van Ommeren, 2018). 12세 이상 인구의 절반 이상이 통근자인 우리나라 또한 예외는 아닌데, 평균 통근 시간이 OECD 평균의 2배 이상에 달하는 등 통근으로 인한 사회문제가 다른 국가에 비해 심각한 상황이다(국토지리정보원, 2021). 통근 거리와 통근 시간의 증가는 사회적 비용을 초래할 뿐 아니라 통근자의 일과 삶의 균형(work-life balance)과 삶의 질에 부정적인 영향을 미치고 있어 중앙정부와 지자체에서는 통근의 효율화를 위해 다핵화 정책 등의 노력을 지속적으로 시행해 왔다(Bai et al., 2021; Jun, 2019; Jun et al., 2018; Kim and Han, 2012; Kwon, 2021).

통근으로부터 야기되는 문제를 해결하기 위해서는 무엇보다 현재의 통근 패턴을 정확하게 파악하는 것이 중요하다. 즉, 대도시권 통근 패턴의 비효율성을 객관적인 지표를 활용해 측정할 필요가 있다는 것이다. 통근 패턴을 파악하기 위한 지표로 '실제 평균 통근 거리'와 함께 "모든 통근자가 가장 가까운 곳으로 통근할 경우 얻을 수 있는 최소의 평균 통근 거리"로 정의되는 '최적 통근 거리'가 널리 사용되고 있다(Jun, 2020; Jun et al., 2016; Ma and Banister, 2006a; Sohn, 2005; 김현우·김호연, 2011; 송미령, 1998; 이삼수, 2004; 이소희·이명훈, 2003; 전명진, 1995; 전명진·정지은, 2011). 이외에도 최적 통근 거리의 반대, 즉 "모든 통근자가 가장 먼 곳으로 통근할 경우 얻을 수 있는 최대의 평균 통근 거리"인 '최대 통근 거리'와 이들 지표를 통해 계산된 '초과 통근율', '통근 잠재력 사용률' 등의 지표도 통근 패턴 평가를 위해 보편적으로 활용된다(Ma and Banister, 2006a; Ma and Banister, 2006b; Ma and Banister, 2007; Kanaroglou et al., 2015).

그런데, 이러한 지표를 합리적인 통근 정책의 근거로 활용하기에는 두 가지 한계가 있다. 첫째, 우리나라 대도시권의 사회경제적 및 지리공간적 특성은 상이하므로 도시공간구조의 변화가 통근 패턴에 미치는 영향이 모든 대도시권에서 동일한 방향, 또는 강도로 나타나는지는 미지수라는 점이다(Grunfelder et al., 2015; Hipp et al., 2022; Ma and Banister, 2007; 권창기·정현욱, 2007; 정진원 외, 2020; 허재원·나종익, 2012). 즉, 직주의 공간적 분포가 서로 유사한 두 대도시권에서 통근 패턴이 다르게 나타난다면, 통근 패턴의 효율화를 위해 각 대도시권에 적용되어야 할 해결책도 다를 수 있다는 것이다. 둘째, 이러한 지표는 일반적으로 행정구역 단위로 산출되기 때문에 공간단위 수정 가능성 문제(MAUP: Modifiable Areal Unit Problem)에서 자유롭지 못하다는 한계가 있다(Horner and Murray, 2002; Ma and Banister, 2006a; Niedzielski et al., 2013; Small and Song, 1992). 따라서 지표의 산출 결과를 대도시권 간의 비교나 시계열 비교에 그대로 사용하면 다소 편향된 결론으로 이어질 우려가 있다. 통근 지표 산출 과정에서 발생하는 MAUP의 해결을 위해 행정구역 내부에서 발생하는 통근 거리에 통근자의 평균 통근 거리를 사용하거나 행정구역의 크기에 비례한 값을 대입하는 등의 방안이 제시되어 왔다(Frost et al., 1998; Horner and Murray, 2002; O'Kelly and Lee, 2005; Sang et al., 2011; Small and Song, 1992). 하지만 이러한 방안은 지표 산출이 행정구역 단위로 이루어지기에 MAUP에 대한 근본적인 해결책은 되지 못했는데, 최근에는 이를 극복하기 위한 보다 근본적인 대안으로 지표 산출을 개인 단위로 수행하는 Monte-Carlo Simulation 기반 접근 방법이 제시되었다(Hu and Wang, 2015). 이 방법을 적용할 경우, MAUP에 구애받지 않고 통근 지표를 산출할 수 있기 때문에 대도시권 간 통근 패턴을 합리적으로 비교할 수 있다.

이러한 배경하에 본 연구에서는 MAUP로부터의 영향을 최소화하면서 우리나라 대도시권의 통근 패턴을 비교하고자 도시·교통 분야 연구에서 사용되는 Monte-Carlo Simulation 기반 접근을 통해 각 대도시권의 통근 지표를 산출하였다(Hu and Wang, 2015; 강재영·김종진, 2024). 구체적으로, Hu and Wang(2015)이 제시한 방법을 우리나라 대도시권에 알맞게 적용하기 위하여 시물레이션에 사용되는 주거지와 근무지가 실제 주거용 건물과 비주거용 건물의 위치에서 선택되어야 한다는 제약조건을 추가한 Constrained Monte-Carlo Simulation을 수행하였다. 2016년 가구통행실태조사 자료를 활용하여 광역도시계획이 수립된 14개 대도시권 중 제주 대도시권을 제외한 내륙의 13개 대도시권을 시물레이션하고 그 결과를 비교하였다.

이후의 논의는 다음과 같다. 우선 2장에서는 통근 지표의 정의와 지표 측정 방법에 관련된 선행연구를 검토하고, 3장에서 본 연구에서 사용한 데이터와 시물레이션 방법을 설명한다. 4장에서는 시물레이션 결과와 그 비교 결과를 설명하고, 이를 바탕으로 5장에서 결론과 시사점을 제시한다.

2. 선행연구 검토

Hamilton(1982)에 의해 처음 제시된 최적 통근 거리(optimal commuting distance)는 현재의 직주 분포를 바탕으로 모든 통근자가 가장 가까운 곳으로 통근할 경우 얻을 수 있는 최소의 평균 통근 거리로 정의될 수 있다. 당시 그가 이 개념을 소개한 주된 목적은 단핵구조 도시모형에 오류가 있음을 보여주기 위함이었으나, 최적 통근 거리라는 새로운 개념은 이내 학계의 큰 관심을 끌었고 점차 통근 관련 연구에 널리 사용되었다(Jun, 2020; Jun et al., 2016; Kanaroglou et al., 2015; Ma and Banister, 2006a; 2006b; Ma and Banister, 2007; Sohn, 2005; 김현

우·김호연, 2011; 송미령, 1998; 이삼수, 2004; 이소희·이명훈, 2003; 전명진, 1995; 전명진·정지은, 2011).

Hamilton(1982)은 최적 통근 거리와 실제 평균 통근 거리를 사용하여 '낭비 통근(wasteful commuting)'이라는 개념을 함께 제시하였다. 낭비 통근은 실제 통근 거리에서 최적 통근 거리를 뺀 값과 실제 통근 거리의 비율로 계산된다. 그는 이를 직주의 불균형이 통근 거리에 미치는 영향의 정도로 해석했는데, 미국 전체의 최적 통근 거리가 평균 1.1 마일인데 반해 실제 통근 거리는 평균 8.7 마일로 산출되었다는 점을 지적하면서 단 13%의 통근 거리만이 직주의 불균형으로 인해 설명된다고 주장하였다.

그러나 Hamilton(1982)이 제시한 최적 통근 거리 계산법은 도시가 단핵구조일 때를 가정하여 만들어졌을 뿐만 아니라 실제 직주의 분포를 고려하지 못했다는 한계가 있어, 현재는 White(1988)가 제시한 선형 프로그래밍(linear programming) 기반 계산 방법이 널리 사용되고 있다. 이 방법은 각 행정구역의 출발 통근량과 도착 통근량이 실제와 동일하면 서도 전체 통근 거리의 합이 최소가 되도록 하는 통근 OD를 구하는 것이다. 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다(식 (1)). White(1988)는 이 방법을 통해 계산한 낭비 통근율을 제시하며, 실제 낭비 통행은 Hamilton(1982)이 제시한 것만큼 크지 않다고 주장했다. 이후, 두 연구 결과에 차이가 발생한 원인은 행정구역 단위의 차이에서 비롯된 것이 Small and Song(1992)에 의해 밝혀졌다. 그들은 중립적인 용어 사용을 위해 '낭비 통근'을 '초과 통근(excess commuting)'이라 칭하였는데, 그 이후 '초과 통근' 또는 '초과 통근율'이 보다 널리 사용되는 용어로 자리 잡았다(Ma and Banister, 2006a).

행정구역 i 와 j 사이의 거리 C_{ij}

행정구역 i 에서 j 로 통근하는 통근자 수 x_{ij}

행정구역 i 에 사는 통근자 수 R_i
 행정구역 j 로 통근하는 통근자 수 E_j
 전체 통근자 수 N 에 대하여

$$\sum_j \chi_{ij} = R_i, \sum_i \chi_{ij} = E_j, \chi_{ij} \geq 0 \text{ 를 만족하고}$$

$$\sum_i \sum_j (C_{ij} \chi_{ij}) / N \text{ 를 최소화 하는}$$

$$\chi_{ij} \text{로 이루어진 OD행렬을 구한다} \quad (1)$$

초과 통근율은 대도시권의 통근 패턴을 쉽게 이해할 수 있는 지표라는 점에서 그 의미가 있지만, 이 지표를 활용하여 도시권 간의 비교나 시계열 비교를 수행한다면 잘못된 결론으로 이어질 가능성이 있다. Ma and Banister(2007)는 최적 통근 거리와 실제 평균 통근 거리의 변화에 따라 나타날 수 있는 초과 통근율의 변화를 11개 시나리오로 나누어 제시하였다. 예를 들어, 최적 통근 거리와 실제 평균 통근 거리

가 모두 증가하는 상황에서, 최적 통근 거리의 증가폭이 실제 평균 통근 거리의 증가폭보다 더 크게 나타난다면 초과 통근율은 줄어들 것이다. 따라서, 합리적인 통근 패턴의 효율성 평가를 위해서는 “현재의 직주 분포를 바탕으로 모든 통근자가 가장 먼 곳으로 통근할 경우 얻을 수 있는 최대의 평균 통근 거리”로 정의되는 지표인 최대 통근 거리를 함께 살펴볼 필요가 있다(Kanaroglou et al., 2015; Ma and Banister, 2006a; Ma and Banister, 2007). 이렇게 산출한 최대 통근 거리와 최적 통근 거리, 그리고 실제 평균 통근 거리를 활용해 해당 대도시권의 통근 패턴 효율성 수준을 보다 정확하게 확인할 수 있다. 즉, 실제 평균 통근 거리가 최적 통근 거리에 가깝다면 효율적인 통근 패턴을 보이는 것이고, 반대로 최대 통근 거리에 가깝다면 보다 비효율적인 통근 패턴을 보이는 것으로 볼 수 있다(Ma and Banister, 2006a). 또한, 최대 통근 거리, 최적 통근 거리, 그리

Table 1. Summary of Commuting Indices

Index	Meaning
Optimal Commuting Distance C_{\min}	The average commuting distance when all commuters commute to the closest workplace. The lower value represents that the housings and jobs are spatially balanced.
Actual Commuting Distance C_{obs}	The actual commuting distance of commuters.
Maximum Commuting Distance C_{\max}	The average commuting distance when all commuters commute to the farthest workplace. The commuting pattern could be investigated by comparing the maximum commuting distance to the optimal and the actual commuting distance.
Excess Commuting C_{ex}	$C_{ex} = (C_{\text{obs}} - C_{\min}) / C_{\text{obs}}$ The lower value represents that commuting distance is close to the theoretical minimum distance, and represents that the commuting pattern corresponds to the urban spatial structure.
Commuting Potential Utilized C_u	$C_u = (C_{\text{obs}} - C_{\min}) / (C_{\max} - C_{\min})$ The lower value represents that commuting distance is short, compared to the theoretical maximum distance, and represents that commuting pattern is efficient considered the spatial separation of housings and jobs.

Source: Kanaroglou et al. (2015)

고 실제 평균 통근 거리를 활용하여 통근 잠재력 사용률(commuting potential utilized) 수치를 계산할 수 있다(Kanaroglou et al., 2015).

통근 지표에 대해 분석한 Kanaroglou et al.(2015)에 따르면, 각 지표는 다음과 같이 해석할 수 있다(Table 1). 최적 통근 거리는 낮을수록 직주의 공간적 균형이 잘 이루어져 있음을 의미하고, 최대 통근거리와 실제 평균 통근 거리와의 비교를 통해 현재 통근 패턴의 특징을 파악할 수 있다. 초과 통근율은 낮을수록 이론상 실현 가능한 최소의 통근 거리와 가까운 수치의 통근 거리가 현상으로서 나타나고 있음을 의미하고, 통근 잠재력 사용률은 낮을수록 이론상 관측 가능한 최대의 통근 거리에 비해 낮은 수치의 통근 거리가 현상으로서 나타나고 있음을 의미한다.

상술한 통근 지표는 행정구역 단위로 산출하는 것이 일반적이다. 그러나 이 방식은 측정 단위(즉, 행정구역)의 위계(규모)나 경계에 따라 발생하는 오차, 즉 MAUP로부터 자유롭지 못한 근본적인 한계를 보인다(Horner and Murray, 2002; Ma and Banister, 2006a; Niedzielski et al., 2013; Small and Song, 1992). 행정구역 단위 산출에서는 행정구역의 중심지점 간 거리를 통근 거리로 사용하는데, 행정구역의 형태나 면적 등에 의해 통근자의 실제 통근 거리와의 오차가 발생하게 된다. 이때, 행정구역의 면적과 형태는 도시권마다 상이하므로 도시권 간 비교의 합리성을 확보하기 어렵다는 한계가 있었다.

이러한 한계를 극복하고자 MAUP로 인한 영향을 최소화하기 위한 방법들이 다양하게 고안되어 왔다. 가장 대표적인 방법은 행정구역 내 통근 거리에 0이 아닌 다른 수치를 대입하는 것이다(Horner and Murray, 2002). 예를 들어 Small and Song(1992)은 행정동 별 출발 통근자의 평균 통근 거리를 행정구역 내 통근 거리로 활용하였고, Frost et al. (1998), O'Kelly and Lee(2005), Sang et al.(2011) 등은 행정구역의 면적에 비례한 값을 사용하였다. 그러나

이들 방법은 MAUP를 근본적으로 해결한 것이 아니라는 한계를 지니고 있다.

MAUP에 대한 근본적인 해결을 위해서는 데이터의 지리적 위치가 행정구역 단위가 아닌 개인 단위로 제공될 필요가 있다. 그러나, 가구통행실태조사와 같은 통근 관련 자료의 경우 개인정보의 보안과 같은 이유로 행정구역 단위로 집계된 자료만 제공되고 있는 것이 현실이다. Hu and Wang(2015)은 이러한 한계를 극복하고자 Monte-Carlo Simulation을 사용하여 행정구역 단위의 자료를 개인 단위로 분해하였다(식 (2)). 그들은 시뮬레이션에 사용되는 주거지와 근무지를 행정구역 내에서의 출발 통근량과 도착 통근량에 비례하여 완전 무작위로 선택하였다. 예를 들어 통근자의 50%를 시뮬레이션 한다고 가정하면, 200명이 출발하고 100명이 도착하는 행정구역에서 100곳의 주거지와 50곳의 근무지가 완전 무작위로 선택되도록 하였다. 최종적으로, 선택된 주거지와 근무지 간 네트워크 거리를 측정하여 전체 통근 거리의 합이 최소가 되도록 주거지와 근무지를 쌍으로 묶은 후 그 평균 통근 거리를 최적 통근 거리로 사용하였다. Hu and Wang(2015)은 이 방법을 사용하면 통근 지표를 개인 단위로 산출하게 되어 MAUP를 회피할 수 있고, 따라서 보다 정확한 통근 지표를 계산할 수 있다고 설명하였다.

주거지 k 와 근무지 l 사이의 거리 C_{kl}

시뮬레이션하는 통근자 수 n 에 대하여

$$\sum_{l=1}^n f_{kl} = 1, \sum_{k=1}^n f_{kl} = 1,$$

k 에서 l 로의 통행이 선택될 경우 $f_{kl} = 1$,

이외에는 0을 만족하고,

$$\sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n (C_{kl} f_{kl}) / n \text{ 를 최소로 하는}$$

f_{kl} 로 이루어진 OD행렬을 구한다 (2)

하지만, Hu and Wang(2015)의 접근 방법은 주거지와 근무지를 행정구역 내에서 완전 무작위로 선택하게 되므로, 우리나라의 대도시권에 그대로 적용하면 산이나 강과 같이 실제로 건축물이 위치할 수 없는 공간을 배제할 수 없는 문제가 발생한다. 따라서, 본 연구에서는 그들의 접근 방법을 확장하여 주거지와 근무지가 실제로 존재하는 건축물 위치에서만 선택되도록 하는 Constrained Monte-Carlo Simulation을 적용하였다. 3장에서는 본 연구의 분석 대상과 분석에 사용한 자료, 그리고 Constrained Monte-Carlo Simulation에 대해 자세히 설명한다.

3. 분석의 틀

3.1 분석 대상 및 자료

본 연구는 광역도시계획이 수립된 전국 14개 대도시권 중 제주 대도시권을 제외한 13개 대도시권을 대상으로 한다(Fig. 1). 제주 대도시권은 내륙의 대도시권과 다르게 고립된 교통망을 가지고 있어 본 연구의 대상에서 제외하였다. 통근 형태 자료는 2016년 전국 가구통행실태조사 결과를 활용하였다. 연구 수행 시점에서 구득 가능한 최신의 가구통행실태조사 자료는 2021년의 것이었다. 그러나, 2021년은 COVID-19의 유행으로 인해 통행 패턴의 변화가 있었고(Lee et al., 2023), 조사 표본율 또한 0.22%로 2016년의 1.15%에 비해 크게 낮았기 때문에 2016년 가구통행실태조사 자료를 분석에 활용하였다. 가구통행실태조사 자료의 목적통행 출발 행정동과 도착 행정동, 그리고 통행의 목적을 기준으로 대도시권 및 행정동 별 출발 통근량과 도착 통근량을 산출하였다. 대도시권 외부에서 출·도착하는 통근이 지표의 산출 결과에 영향을 미칠 수 있음이 알려져 있으나, 이를 시뮬레이션에 포함하면 대도시권의 범위가 거대해져 더 큰 오차로 이어질 가능성이 있으므로 시뮬레이션의 대상은 각 대도시권 내부에서 출·

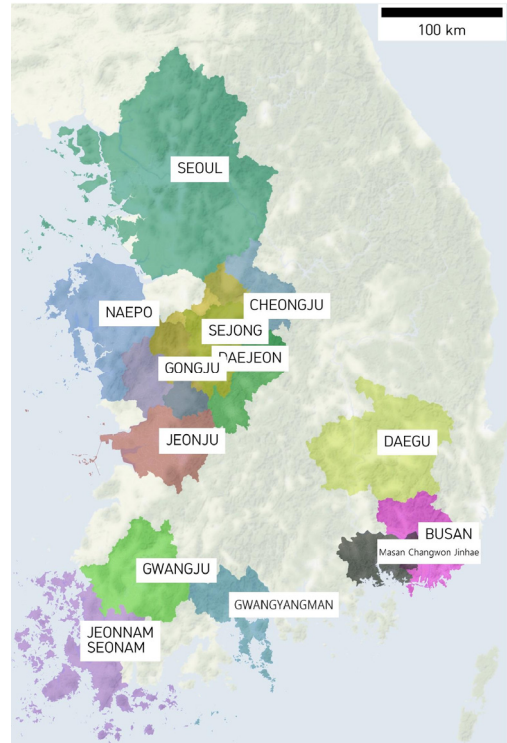


Fig. 1. Boundary of the Metropolitan Areas Simulated in This Study

Note: Some of the Islands are Not Drawn for Better Readability

도착하는 통근으로 한정하였다(Kanaroglou et al., 2015; Ma and Banister, 2006a). 행정동 경계도와 네트워크 도면은 가구통행실태조사와 함께 제공된 자료를 사용하였고, 결측치와 이상치를 제거한 93,494 통행을 분석에 활용하였다.

본 연구에서는 주거지와 근무지가 실제로 존재하는 건축물 위치에서만 선택될 수 있다는 제약 조건을 추가하여 보다 정확한 시뮬레이션을 수행하고자 하였다. 그러나, 2016년 당시의 용도별 건축물 좌표는 현재 시점에서 구득이 어려웠기에 국가공간정보 포털에서 제공하는 용도별 건물정보 데이터베이스와 세움터에서 제공하는 말소건축물대장을 활용하여 2016년 당시의 용도별 건축물 현황을 복구하였다. 2023년 5월 22일 기준 용도별 건물정보 데이터

베이스에서 2017년 이후 사용승인된 건축물을 제외하고, 말소건축물대장에서 2017년 이후 말소된 건축물을 추가하여 2016년 당시 존재하였던 건축물 리스트를 구축하였다. 말소건축물대장에는 좌표 정보가 포함되어 있지 않아 등록된 주소를 Naver API를 활용하여 공간 좌표로 변환하였다. 복구된 용도별 건축물 데이터를 용도가 주거용인 건물과 주거용이 아닌 건물로 분리하여 두 개의 데이터베이스를 구축하였다. 오피스텔의 경우 주거와 비주거용 용도가 모두 발생할 수 있으므로 주거용과 비주거용 건물 데이터베이스에 모두 포함시켰다.

3.2 Constrained Monte-Carlo Simulation 수행 방법

상술한 과정을 통해 구축한 데이터를 토대로 대도시권 별 최적 통근 거리, 최대 통근 거리, 그리고 실제 평균 통근 거리를 산출하기 위하여 Constrained Monte-Carlo Simulation을 수행하였다. 시뮬레이션의 구체적인 수행 순서는 다음과 같다. 우선 가구 통행실태조사 자료를 바탕으로 행정동별 출발 통근량과 도착 통근량을 파악하였다. 시뮬레이션에 사용할 통근자의 비율에 비례하여 행정동 별로 시뮬레이션에 사용할 주거용 건물과 비주거용 건물을 무작위로 추출하였다. 예를 들어 행정동별 출발 통근량이 200, 도착 통근량이 100인 행정동에서 시뮬레이션 비율을 25%로 설정할 경우, 해당 행정동에 위치한 주거용 건물 중 50동과 비주거용 건물 중 25동을 무작위로 추출하였다. 비록 일정 비율 이상에서는 시뮬레이션 비율에 따른 산출 결과의 차이가 나타나지 않았지만(Hu and Wang, 2015), 보다 정확한 시뮬레이션을 위하여 오류가 발생하지 않는 가장 높은 비율을 대도시권 별로 설정하였다. 만일 주거용과 비주거용 건물 수가 일치하지 않는 경우 보다 많은 건물 데이터에서 적은 건물 데이터의 수와 일치하도록 무작위로 제외하였다.

시뮬레이션에 사용할 건축물을 추출한 후, 각 건축물 간 네트워크 거리를 계산하여 거리 행렬을 구축하였다. 주거용 건물에서 출발하여 비주거용 건물에 도착하는 네트워크 거리를 python의 geopandas와 NetworkX 패키지를 활용하여 계산하였다. 구축된 거리 행렬과 아래의 수식을 활용하여 선형 프로그래밍을 통해 최적 통근 거리를 산출하였다(식 (3)). 선형 프로그래밍에는 python과 gurobi 패키지를 사용하였다. 계산된 개인 단위 최적 통근 거리를 평균하여 대도시권의 최적 통근 거리를 산출하였다. 이와 동일한 방식으로 최소의 값을 찾는 대신 최대의 값을 찾아 최대 통근 거리를 산출하였다.

실제 평균 통근 거리의 경우, 시뮬레이션 비율을 100%로 하고 주거용 건축물과 비주거용 건축물을 추출한 후 실제 행정동 간 통근 OD에 비례하여 건축물을 1대 1로 무작위로 매칭하였다. 매칭된 건축물 쌍에 해당하는 네트워크 거리를 실제 통근 거리로 보고, 그 평균값을 실제 평균 통근 거리로 사용하였다.

주거용 건물 데이터베이스 R ,
비주거용 건물 데이터베이스 E 에 대하여
 $k \in R, l \in E$ 를 만족하는
주거지 k 와 근무지 l 사이의 거리를 C_{kl} ,
시뮬레이션하는 통근자 수를 n 이라 할 때

$$\sum_{l=1}^n f_{kl} = 1, \sum_{k=1}^n f_{kl} = 1,$$

k 에서 l 로의 통행이 선택될 경우 $f_{kl} = 1$,

이외에는 0를 만족하고, $\sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n (C_{kl} f_{kl}) / n$ 를

최소·최대로 하는 f_{kl} 로 이루어진

OD행렬을 구한다

(3)

시뮬레이션은 Intel Core i9-10980XE 3.0GHz CPU,

256GB 2,666MHz RAM을 가진 워크스테이션을 사용해 수행하였다. 하나의 대도시권을 시뮬레이션 하는데 적게는 수 시간부터 많게는 만 하루에 가까운 시간이 소요되었다. 메모리(RAM)의 한계로 인하여 서울 대도시권은 최적 및 최대 통근 거리 산출에 샘플의 18%를 무작위추출하여 사용하였다. 약 11,000개 샘플을 가지고 수행된 서울 대도시권의 경우 메모리를 약 240GB까지 사용하였다.

Constrained Monte-Carlo Simulation의 유용성을 평가하기 위해, 기존의 통근 지표 산출 방법을 활용하여 통근 지표를 산출하고 이를 시뮬레이션의 결과와 비교하였다. 기존의 통근 지표 산출 방법은 행정동의 중심 지점(centroid)을 거리 산출의 기준으로 삼는 방법으로, 행정구역 단위의 선형 프로그래밍 방법을 사용하되, 행정구역 내 통근 거리는 Frost et al.(1998), O'Kelly and Lee(2005), Sang et al.(2011) 등에서 활용된 바와 같이 행정구역의 면적에 비례한 값을 사용하였다. 상술한 과정을 거쳐 산출된 최적 통근 거리, 최대 통근 거리, 그리고 실제 평균 통근 거리를 대도시권 별로 제시하고 각 대도시권의 통근 효율성을 상대적으로 평가하였다. 4장에서는 그 결과에 관해 설명한다.

4. 분석 결과

4.1 산출 방법 간 비교

Table 2와 Fig. 2는 우리나라 내륙의 13개 대도시권으로 대상으로 한 통근 지표를 기존의 방법과 Constrained Monte-Carlo Simulation을 사용하여 각각 산출한 결과를 비교한 것이다. 산출 방법에 따른 통근 지표값의 차이는 전반적으로 작은 수준으로 나타났으나, 그 크기는 대도시권에 따라 다소 편차가 있는 것으로 확인되었다. 첫째, 최적 통근 거리는 3개 대도시권을 제외하고는 기존 산출 방법의 결과가 시뮬레이션 결과보다 더 크게 나타났다. 차이의 크기는 서울 대도시권에서 0.06km로 가장 작게 나타났고, 전남 서남 대도시권에서 1.66km로 가장 크게 나타났다. 둘째, 실제 평균 통근 거리는 광양만 대도시권과 전남 서남 대도시권에서는 시뮬레이션의 결과가 기존 방법의 결과보다 더 작게 나타났지만, 다른 대도시권에서는 반대로 나타났다. 차이의 크기는 광양만 대도시권이 0.18km 차이로 가장 작게 나타났고, 공주 대도시권이 1.31km 차이로 가장 크게 나타났다. 셋째, 최대 통근 거리는 모든 대도시권에서 시뮬레이션의 결과가 기존 방법의 결과보다 더

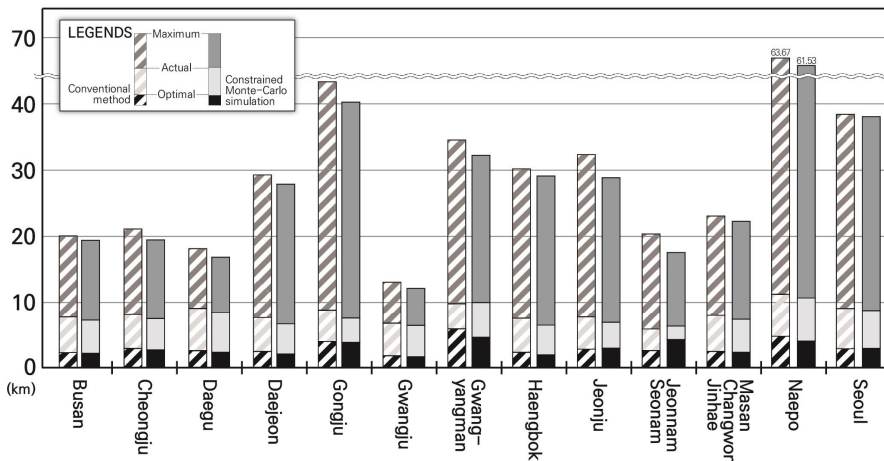


Fig. 2. Comparison of the Commuting Indices by Calculation Method

Table 2. Comparison of the Commuting Indices by Calculation Method

Metropolitan Area	Method	No. of Commuters	Optimal	Actual	Maximum
Busan	Conventional*	8,054	2.28 km	7.71 km	20.06 km
	Monte-Carlo	8,003	2.17 km	7.22 km	19.40 km
Cheongju	Conventional	1,088	2.91 km	8.08 km	21.11 km
	Monte-Carlo	1,066	2.68 km	7.46 km	19.48 km
Daegu	Conventional	3,943	2.58 km	9.08 km	18.14 km
	Monte-Carlo	3,877	2.34 km	8.44 km	16.86 km
Daejeon	Conventional	4,206	2.45 km	7.63 km	29.28 km
	Monte-Carlo	4,163	2.07 km	6.65 km	27.87 km
Gongju	Conventional	235	3.97 km	8.85 km	43.33 km
	Monte-Carlo	196	3.83 km	7.54 km	40.27 km
Gwangju	Conventional	2,831	1.80 km	6.74 km	13.07 km
	Monte-Carlo	2,797	1.64 km	6.41 km	12.16 km
Gwangyangman	Conventional	199	5.89 km	9.81 km	34.54 km
	Monte-Carlo	147	4.60 km	9.99 km	32.23 km
Haengbok	Conventional	4,238	2.32 km	7.53 km	30.21 km
	Monte-Carlo	4,221	1.95 km	6.46 km	29.11 km
Jeonju	Conventional	325	2.80 km	7.72 km	32.35 km
	Monte-Carlo	239	2.95 km	6.87 km	28.89 km
Jeonnam seonam	Conventional	136	2.59 km	5.88 km	20.37 km
	Monte-Carlo	102	4.25 km	6.31 km	17.55 km
Masan Changwon Jinhae	Conventional	1,651	2.45 km	7.95 km	23.06 km
	Monte-Carlo	1,596	2.35 km	7.35 km	22.27 km
Naepo	Conventional	593	4.76 km	11.25 km	63.67 km
	Monte-Carlo	557	4.02 km	10.69 km	61.53 km
Seoul	Conventional	61,886	2.87 km	9.07 km	38.41 km
	Monte-Carlo	11,134	2.93 km	8.75 km	38.07 km

* Calculate at TAZ level, used $d_{ii} = \sqrt{R/\pi}$ for intrazonal distance of zone i.

If the minimum distance between zone i and j $Y_{ij} < d_{ii} (i \neq j)$, $D_{ii} = (Y_i^{\min} / d_{ii}) \times Y_i^{\min}$ was used instead

작게 나타났다. 편차는 서울 대도시권의 0.34km와 전주 대도시권의 3.46km 사이로 나타났다.

이러한 차이는 두 산출 방법의 차이에서 비롯된 것으로 생각된다. 기존의 산출 방법은 각 행정동의 중심 지점(centroid)을 기준으로 하여 행정동 간 거리를 측정하는 반면, Constrained Monte-Carlo

Simulation에서는 각 출발지점과 도착지점 간의 거리를 모두 측정하여 사용한다. 이 때, 지형지물의 영향으로 중심 지점 간 거리보다 출발지점과 도착지점 간 거리가 매우 길게 나타난다면 시뮬레이션의 결과가 기존 방법의 결과보다 더 크게 나타날 가능성이 존재한다. 광양만과 전남 서남 대도시권의 경우 도서

지역에 많은 통근자가 위치하는 특성을 가지고 있기 때문에 다른 대도시권과 상이한 결과가 나온 것으로 생각된다. 반면, 서울 대도시권의 경우 도서 지역이 차지하는 비율이 상대적으로 작고, 사회기반시설이 잘 갖추어져 있기 때문에 방법에 따른 산출 결과의 차이가 상대적으로 작게 나타난 것으로 판단할 수 있다.

각 대도시권의 샘플 수 또한 산출 결과의 차이에 영향을 미쳤을 것으로 생각된다. 만일 어떠한 행정 동에서 충분히 많은 수의 샘플이 무작위로 선택된다면, 그 샘플들은 행정동 전역에 걸쳐 고르게 위치할 확률이 높아지므로 중심 지점을 기준으로 한 산출 결과와의 차이는 상대적으로 작아질 것이다. 그러나, 샘플의 수가 적을수록 선택된 샘플의 위치는 행정동 내에서 고르게 분포하지 않을 확률이 높아지고, 이에 따라 산출 방법에 따른 결과의 차이 또한 상대

적으로 크게 나타날 것으로 예상할 수 있다.

Constrained Monte-Carlo Simulation과 기존 방법의 산출 결과를 비교한 결과, 두 방법 간 차이의 양상은 대도시권 전반에 걸쳐 유사하게 나타났다. 일부 대도시권의 경우 다른 대도시권과는 다소 상이한 특성을 보였는데, 이는 기존 산출 방법에서 발생하는 오차가 대도시권의 지형이나 행정구역의 형태 및 면적 등에 의해 상이하게 발생하기 때문에 나타나는 현상으로 생각된다. 이에, 본 연구에서 수행한 시물레이션의 결과를 채택하고 이를 바탕으로 4.2에서 대도시권 간 통근 효율성의 차이를 파악하였다.

4.2 대도시권 간 비교

우리나라 내륙의 13개 대도시권으로 대상으로 한 시물레이션 수행 결과는 Table 3, Fig. 3과 같다. 최

Table 3. Results of the Constrained Monte-Carlo Simulation by Metropolitan Area

Metropolitan Area	Area	Simulation Rate*	Optimal	Actual	Maximum	Excess	Utilized
Busan	1,899 km ²	99.4%	2.17 km	7.22 km	19.40 km	69.90%	29.30%
Cheongju	3,403 km ²	98.0%	2.68 km	7.46 km	19.48 km	64.03%	28.43%
Daegu	4,977 km ²	98.3%	2.34 km	8.44 km	16.86 km	72.24%	41.97%
Daejeon	5,123 km ²	99.0%	2.07 km	6.65 km	27.87 km	68.90%	17.76%
Gongju	2,584 km ²	83.4%	3.83 km	7.54 km	40.27 km	49.14%	10.17%
Gwangju	2,995 km ²	98.8%	1.64 km	6.41 km	12.16 km	74.37%	45.30%
Gwangyangman	1,853 km ²	73.9%	4.60 km	9.99 km	32.23 km	53.99%	19.52%
Haengbok	3,597 km ²	99.6%	1.95 km	6.46 km	29.11 km	69.81%	16.59%
Jeonju	2,457 km ²	73.5%	2.95 km	6.87 km	28.87 km	57.08%	15.14%
Jeonnam Seonam	3,711 km ²	75.0%	4.25 km	6.31 km	17.55 km	32.63%	15.46%
Masan Changwon Jinhae	1,624 km ²	96.7%	2.35 km	7.35 km	22.27 km	68.08%	25.11%
Naepo	3,507 km ²	93.9%	4.02 km	10.69 km	61.53 km	62.39%	11.59%
Seoul	11,704 km ²	18.0%	2.93 km	8.75 km	38.07 km	66.56%	16.57%
Average**	4,494 km ²	42.6%	2.91 km	7.70 km	28.13 km	62.24%	22.53%

* If the count of the housing and non-housing building data does not match, the larger data was randomly undersampled to match the number.

** Arithmetic mean of each metropolitan area, not weighted.

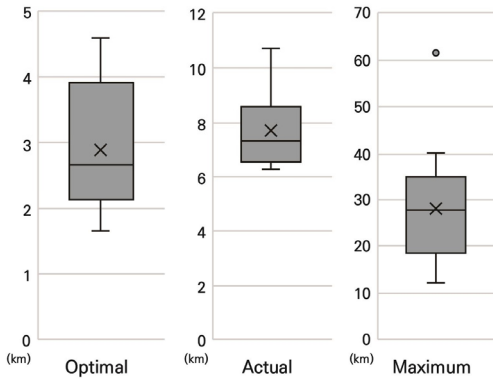


Fig. 3. Boxplots of Optimal, Actual, and Maximum Commuting Distance

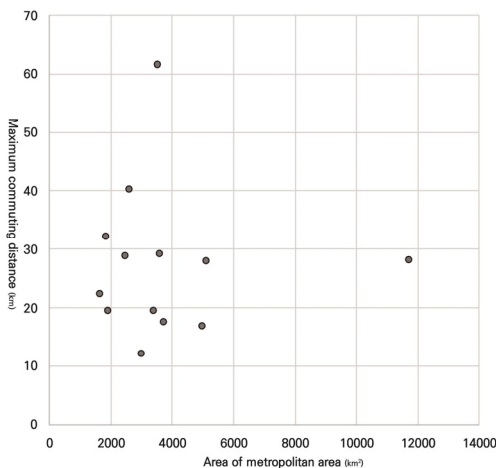


Fig. 4. Pariplot of Area of Metropolitan Area and Maximum Commuting Distance

적 통근 거리는 전체 대도시권 평균 2.91km로 계산되었다. 대도시권 별로는 광주 대도시권이 1.64km로 가장 짧았고, 광양만 대도시권이 4.60km로 가장 긴 것으로 확인되었다. 최적 통근 거리는 직주의 물리적인 균형을 직관적으로 보여주는 지표이므로 (Kanaroglou et al., 2015), 우리나라는 대도시권에 따른 직주의 균형이 최대 2.8배에 달할 정도로 상당히 크게 나타나는 상황임을 확인할 수 있다. 한편, 최대 통근 거리는 전체 대도시권 평균 28.13km로 계산되었고, 광주 대도시권이 12.16km로 가장 짧고

전남 서남 대도시권이 61.53km로 가장 길었다. 대도시권에 따른 최대 통근 거리의 차이는 최대 5.06배로 확인되는데, 최대 통근 거리가 면적에 비례한다는 선행연구의 보고와 달리(Kanaroglou et al., 2015) 면적과의 상관관계가 다소 모호하게 나타났다(Fig. 4). 이는 대도시권에 따른 도서지역 등의 지리적 특성과 사회기반시설의 차이로 인한 현상으로 생각되나, 그 상세한 원인에 대해서는 추가적인 연구를 통해 확인이 필요하다.

실제 통근 패턴은 물리적인 직주의 균형과는 다소 다른 양상을 보였다. 실제 평균 통근 거리 계산 결과, 전체 대도시권 평균은 7.70km로 나타났다. 세부적으로는 전남 서남 대도시권이 6.31km로 가장 짧고, 내포 대도시권이 약 1.69배 더 긴 10.69km로 가장 긴 것으로 확인되었다. 그런데 최적 통근 거리를 고려하여 전남 서남 대도시권의 초과 통근율을 계산하면 32.63%로 산출되는데, 이는 내포 대도시권의 62.39%와 크게 차이를 보인다. 가장 짧은 최적 통근 거리를 보인 광주 대도시권의 실제 평균 통근 거리는 6.41km로, 74.37%의 초과 통근율을 보이면서 전국 대도시권 중 가장 높은 수치를 기록하였다. 통근 잠재력 사용률 또한 대도시권 별로 크게 상이하게 계산되었다. 가장 낮은 통근 잠재력 사용률을 보인 대도시권은 공주 대도시권으로, 10.17%의 수치를 가지는 것으로 계산되었다. 가장 높은 수치는 광주 대도시권의 45.30%였다.

시뮬레이션 결과를 도표로 나타낸 Fig. 2를 통해서 대도시권 간 통근 패턴 차이의 특성을 더욱 명확하게 이해할 수 있다. 대도시권에 따른 차이가 가장 극명하게 나타나는 지표는 최대 통근 거리이다. 최적 통근 거리와 실제 평균 통근 거리는 그에 비하면 상대적으로 차이가 작게 나타나는 것으로 보이지만, 비율로는 각각 최대 2.8배, 1.69배 차이가 나타난다. 흥미로운 점은 직주의 물리적 균형과 실제 통근 패턴이 일치하는 정도가 대도시권에 따라 다르게 나타

난다는 점이다. 예를 들어, 지리적으로 인접한 공주 대도시권과 내포 대도시권은 각각 3.83km, 4.02km의 최적 통근 거리를 보이며 유사한 수준의 직주의 물리적 균형을 가지는 것으로 파악되었다. 그러나, 실제 평균 통근 거리는 각각 7.54km, 10.69km로 상당한 차이를 보이고, 초과 통근율도 각각 49.14%, 62.39%로 나타났다. 서울 대도시권과 전주 대도시권 또한 마찬가지로, 거의 동일한 최적 통근 거리를 보이지만 초과 통근율은 각각 66.56%, 57.08%로 약 9.5%p의 차이를 보인다. 이는, 직주의 물리적 균형이 유사한 수준이라고 해서 실제 통근 패턴이 반드시 동일하게 나타나지는 않는다는 것을 보여준다.

시뮬레이션 결과에 따르면, 전체 13개 대도시권 중 전남 서남 대도시권과 공주 대도시권이 상대적으로 효율적인 통근 패턴을 보였다. 전남 서남 대도시권의 경우 가장 낮은 초과 통근율(32.63%)을 보여주었다. 이는 이론상 가능한 가장 짧은 통근 거리에 비해 높지 않은 수준의 실제 평균 통근 거리가 관측됨을 의미하여, 도시 공간 구조와 실제 통근 패턴이 상대적으로 잘 일치하고 있는 것을 보여준다. 공주 대도시권은 가장 낮은 통근 잠재력 사용률(10.17%)을 가지는 것으로 분석되었다. 이는 이론적으로 가능한 가장 긴 통근 거리보다 현저히 낮은 수준의 실제 평균 통근 거리가 관측된다는 것을 의미하며, 통근자가 직주의 물리적 분리에도 불구하고 짧은 통근 거리를 유지하고 있음을 보여준다.

상대적으로 비효율적인 통근 패턴을 보이는 대도시권은 광주 대도시권과 대구 대도시권이었다. 두 대도시권 모두 높은 수준의 초과 통근율(각각 74.37%, 72.24%)을 보여주었는데, 이는 도시 공간 구조와 통근 패턴의 불일치도가 다른 대도시권에 비해 높은 수준으로 나타나는 것을 의미한다. 또한 통근 잠재력 사용률도 각각 45.30%, 41.97%로 높은 수준으로 나타났다. 이는 직주의 물리적 분리에 따라 통근 패턴 또한 상대적으로 길게 나타나는 것을 의미한다.

5. 결 론

본 연구에서는 최적 통근 거리, 실제 평균 통근 거리, 최대 통근 거리와 이를 활용해 계산되는 초과 통근율과 통근 잠재력 사용률 지표를 활용하여 광역도시계획이 수립된 내륙 13개 대도시권의 통근 패턴 효율성을 살펴보았다. 통근 지표의 산출 과정에서 발생하는 MAUP를 해결하고자 Hu and Wang(2015)이 제시한 Monte-Carlo Simulation 기반 접근법에 시뮬레이션 되는 주거지와 근무지의 위치가 실제로 존재하는 건물 위치에만 존재할 수 있다는 제약 조건을 추가한 Constrained Monte-Carlo Simulation을 활용하였다. 용도별 건물정보 데이터베이스, 말소건축물대장을 이용하여 주거지로 사용될 주거용 건물 데이터베이스와 근무지로 사용될 비주거용 건물 데이터베이스를 구축하여 2016년 가구통행실태조사 자료와 함께 시뮬레이션에 사용하였다. 시뮬레이션 결과를 기존 분석 방법을 활용한 통근 지표 산출 결과와 비교하고, 시뮬레이션 결과를 바탕으로 대도시권 간 통근 패턴 효율성을 비교하였다.

분석 결과는 다음과 같다. 첫째, 산출 방법에 따른 통근 지표값의 차이는 전반적으로 작은 수준으로 확인되었다. 차이는 대도시권의 특성에 따라 다소 다른 양상으로 나타났다. 우선, 도서지역을 다수 포함하고 있는 지역의 경우 산출 방법에 따라 통근 지표가 상대적으로 많은 차이를 보이는 것을 확인할 수 있었다. 이는 기존 산출 방법에서는 행정동의 중심 지점 간 거리를 활용하는 반면 시뮬레이션에서는 각 주거지와 근무지 간의 거리를 활용하기 때문에 각 대도시권의 지리적 특성이 반영된 결과로 해석할 수 있다. 한편, 샘플 수가 적은 대도시권도 다소 차이가 크게 나타났는데, 이는 표본 집단의 수가 적은 경우 중심 지점에서 먼 곳에 샘플이 위치할 확률이 높아지고, 이에 따라 중심 지점을 기준으로 한 기존 산출 방법과의 차이가 거치는 것으로 이해할 수 있다.

둘째, 시뮬레이션 결과 대도시권 간 통근 패턴 차이가 다소 존재하는 것으로 확인되었다. 최대 통근 거리가 최대 5.06배 차이로 가장 큰 격차를 보였고, 최적 통근 거리와 실제 평균 통근 거리도 대도시권에 따라 각각 최대 2.8배와 1.69배로 다소 차이가 있는 것으로 나타났다. 통근 잠재력 사용률 또한 최대 4.45배 차이가 나는 것으로 산출되면서 대도시권에 따라 통근 패턴의 효율성이 상이하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 초과 통근율도 마찬가지로 최소 32.63%에서 최대 74.37%까지 큰 편차를 보이는 것으로 나타났는데, 공주 - 내포 대도시권이나 서울 - 전주 대도시권과 같이 최적 통근 거리가 유사한 대도시권이라도 실제 평균 통근 거리는 상이하게 나타나고, 이에 따라 초과 통근율에 차이가 발생하는 것이 확인되었다. 이는 직주의 물리적 균형이 유사하더라도 실제 통근 패턴이 반드시 그와 일치하게 나타나지는 않는 것을 보여주고, 통근 관련 정책을 시행할 때 대도시권에 따른 차이를 적극적으로 반영할 필요가 있다는 점을 시사한다. 상대적으로 효율적인 통근 패턴은 전남 서남 대도시권과 공주 대도시권에서 확인되었고, 비효율적인 통근 패턴은 광주와 대구 대도시권에서 나타났다.

본 연구는 MAUP의 영향을 최소화한 통근 지표를 바탕으로 대도시권 간 통근 패턴 비교의 합리성을 제고하였다는 점에서 의의를 가진다. 그간 MAUP는 대도시권 간 통근 지표 비교의 합리성을 저해하는 것으로 알려져 왔다. 통근 관련 통계 자료는 일반적으로 행정구역 단위로 제공되어 통근자의 실제 출발·도착 장소를 파악할 수 없다는 한계가 있다. 이에 따라 통근자의 출발 행정구역과 도착 행정구역 간 거리를 통근 거리로 대신 사용하게 되고, 이 과정에서 개인의 실제 통근 거리와의 오차가 발생한다. 이 오차의 크기는 행정구역의 형태 면적에 따라 달라지는데, 이는 대도시권별로 상이하기 때문에 동일한 기준으로 산출한 지표라 하더라도 그 오차의 정도는

대도시권에 따라 다르게 나타날 우려가 있었다. 이러한 MAUP로부터의 영향을 최소화하고자 본 연구에서는 행정구역 단위로 집계된 자료를 Monte-Carlo Simulation을 활용하여 개인 단위 자료로 재구성하였다. 이때, 시뮬레이션 과정에서 활용되는 주거지와 근무지의 위치가 실제 건물의 위치에 기반하여 선택될 수 있도록 하는 제약조건을 추가하여 실제의 직주 분포를 반영한 결과를 산출할 수 있었다. 시뮬레이션을 통해 각 통근자의 출발 행정구역에서 무작위로 선택된 주거지와 도착 행정구역에서 무작위로 선택된 근무지 간 거리를 해당 통근자의 통근 거리로 사용하였다. 이를 통해 계산된 통근 지표는 개인 단위로 산출된 것이므로 행정구역 단위로 산출했을 때와 달리 그 오차가 대도시권의 행정구역 특성에 영향을 받지 않고, 따라서 대도시권 간 통근 패턴을 합리적으로 비교할 수 있었다.

그러나 다음과 같은 한계는 향후 연구를 통해 보완될 필요가 있다. 첫째, 본 연구에서는 대도시권 간 상이한 특성에 의한 영향을 보정하지 못하였다. 예를 들어, 비록 광역도시계획을 통해 설정된 대도시권은 그 대상지가 명확하여 면적의 차이가 발생할 수밖에 없으나, 그 대도시권과 실제 통근권이 항상 정확하게 일치하지는 않으므로 보다 정확한 비교를 위해서는 실제 통근권을 고려하여 면적에 따른 영향을 보정할 필요가 있다. 교통망, 산업구조 등의 여건 또한 대도시권마다 다소 차이가 있으므로, 이를 향후 연구에서는 추가적으로 고려해야 할 것으로 생각된다. 둘째, 본 연구는 통근 관련 지표만을 사용하여 대도시권의 통근 패턴 차이를 확인하였다. 다른 지표를 활용하여 대도시권별 통근 패턴의 상이한 특징을 파악하고, 이를 바탕으로 직주의 물리적 균형이 통근 패턴으로 이어지지 않는 이유에 대해 보다 깊은 논의가 필요할 것으로 생각된다. 셋째, 시뮬레이션의 특성상 각 출발지와 도착지 간의 거리 행렬을 계산하는데, 시뮬레이션에 사용하는 통근자의 수를 늘리

면 거리 행렬의 크기는 그 제곱만큼 커지기 때문에 시뮬레이션 할 수 있는 통근자의 수에 한계가 존재한다. 향후 생활이동 등 빅데이터를 활용하여 통근 지표를 산출할 수 있도록 이러한 한계를 극복할 수 있는 시뮬레이션 방법이 연구되어야 할 것으로 보인다.

참고문헌

- 강재영·김종진(2024), “도시계획시설 용량 산정을 위한 확률적 수요 예측에 관한 연구”, 「토지주택연구」, 15(1): 135~146.
- 국토지리정보원(2021), 「대한민국 국가지도집 III」, 수원: 국토지리정보원.
- 권창기·정현욱(2007), “대도시 광역도시권 설정과 권역별 공간 특성 비교”, 「국토연구」, 52: 39~58.
- 김현우·김호연(2011), “수도권 신도시 건설과 서울 거주지의 통근통행패턴 변화”, 「한국경제지리학회지」, 14(3): 437~451.
- 송미령(1998), “서울 대도시권의 도시공간구조와 초과통근”, 「도시계획」, 33(1): 57~75.
- 이삼수(2004), “직주재배치를 통한 서울대도시권 통근통행의 효율성분석”, 「국토계획」, 39(3): 95~109.
- 이소희·이명훈(2003), “직주 공간 배분의 최적화를 통한 통근시간 절감에 관한 연구: 서울대도시권을 중심으로”, 「국토계획」, 38(7): 119~129.
- 전명진(1995), “직주불일치 현상과 낭비통근: 서울시를 중심으로”, 「대한교통학회지」, 13(3): 5~17.
- 전명진·정지은(2011), “수도권 직주불일치 수준 및 초과통근 분석”, 「국토계획」, 46(4): 189~197.
- 정진원·조형진·변병설(2020), “4차 산업혁명 관련 산업의 입지분포와 성장, 2010-2018”, 「국토지리학회지」, 54(4): 461~476.
- 허재원·나종익(2012), “창조산업의 공간적 분포특성에 관한 연구”, 「지방행정연구」, 26(4): 245~274.
- Bai, B., N. Gopalan, N. Beutell and F. Ren (2021), “Impact of Absolute and Relative Commute Time on Work-Family Conflict: Work Schedule Control, Child Care Hours, and Life Satisfaction”, *Journal of Family and Economic Issues*, 42(4): 586~600.
- Frost, M., B. Linneker and N. Spence (1998), “Excess or Wasteful Commuting in a Selection of British Cities”, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 32(7): 529~538.
- Grunfelder, J., T. A. S. Nielsen and N. B. Groth (2015), “Changes to Urban form and Commuting Patterns: Trends in Two Danish City Regions”, *Geografisk Tidsskrift-Danish Journal of Geography*, 115(2): 73~87.
- Hamilton, B. W. (1982), “Wasteful Commuting”, *Journal of Political Economy*, 90(5): 1035~1053.
- Hipp, J. R., S. Lee, J. H. Kim and B. Forthun (2022), “Employment Deconcentration and Spatial Dispersion in Metropolitan Areas: Consequences for Commuting Patterns”, *Cities*, 131: 103947.
- Horner, M. W. and A. T. Murray (2002), “Excess Commuting and the Modifiable Areal Unit Problem”, *Urban Studies*, 39(1): 131~139.
- Hu, Y. and F. Wang (2015), “Decomposing Excess Commuting: a Monte Carlo Simulation Approach”, *Journal of Transport Geography*, 44: 43~52.
- Jun, M.-J. (2019), “Quantifying Welfare Loss due to Longer Commute Times in Seoul: A Two-stage Hedonic Price Approach”, *Cities*, 84: 75~82.
- Jun, M.-J. (2020), “The Effects of Polycentric Evolution on Commute Times in a Polycentric Compact City: A Case of the Seoul Metropolitan Area”, *Cities*, 98: 102587.
- Jun, M.-J., S. Choi, F. Wen and K.-H. Kwon (2016), “Effects of Urban Spatial Structure on Level of Excess Commutes: A Comparison between Seoul and Los Angeles”, *Urban Studies*, 55(1): 195~211.
- Jun, M.-J., K.-H. Kwon and J.-E. Jeong (2018), “An Evaluation of the Value of Time for Commuting in Seoul: A Life Satisfaction Approach”, *International Journal of Sustainable Transportation*, 13(10): 703~709.
- Kanaroglou, P. S., C. D. Higgins and T. A. Chowdhury (2015), “Excess Commuting: A Critical Review and Comparative Analysis of Concepts, Indices, and Policy Implications”, *Journal of Transport Geography*, 44: 13~23.
- Kim, H. M. and S. S. Han (2012), “Seoul”, *Cities*, 29(2): 142~154.

25. Kwon, K. (2021), "Polycentricity and the Role of Government-led Development: Employment Decentralization and Concentration in the Seoul Metropolitan Area, 2000-2015", *Cities*, 111: 103073.
26. Lee, J., T.-H. T. Gim, Y. Park, H.-C. Chung, W. Handayani, H.-C. Lee, D. K. Yoon and J. T. Pai (2023), "How Did the COVID-19 Pandemic Affect Mobility, Land Use, and Destination Selection? Lesson from Seoul, Korea", *LHI Journal*, 54(4): 77~93.
27. Ma, K. R. and D. Banister (2006a), "Excess Commuting: A Critical Review". *Transport Reviews*, 26(6): 749~767.
28. Ma, K.-R. and D. Banister (2006b), "Extended Excess Commuting: A Measure of the Jobs-Housing Imbalance in Seoul", *Urban Studies*, 43(11): 2099~2113.
29. Ma, K.-R. and D. Banister (2007), "Urban Spatial Change and Excess Commuting", *Environment and Planning A*, 39: 630~646.
30. Niedzielski, M. A., M. W. Horner and N. Xiao (2013), "Analyzing Scale Independence in Jobs-Housing and Commute Efficiency Metrics", *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 58: 129~143.
31. O'Kelly, M. E. and W. Lee (2005), "Disaggregate Journey-to-Work Data: Implications for Excess Commuting and Jobs-Housing Balance", *Environment and Planning A*, 37: 2233~2252.
32. Sang, S., M. O'Kelly and M.-P. Kwan (2011), "Examining Commuting Patterns: Results from a Journey-to-Work Model Disaggregated by Gender and Occupation", *Urban Studies*, 48(5): 891~909.
33. Small, K. A. and S. Song (1992), "'Wasteful' Commuting: A Resolution", *Journal of Political Economy*, 100(4): 888~898.
34. Sohn, J. (2005), "Are Commuting Patterns a Good Indicator of Urban Spatial Structure?", *Journal of Transport Geography*, 13(4): 306~317.
35. Van Ommeren, J. (2018), *Commuting and Relocation of Jobs and Residences*, New York: Routledge.
36. White, M. J. (1988), "Urban Commuting Journeys Are Not 'Wasteful'", *Journal of Political Economy*, 96(5): 1097~1110.

요 약

통근 패턴의 효율성을 평가하기 위해 초과 통근율과 통근 잠재력 사용률과 같은 다양한 통근 지표들이 개발되고 사용되어 왔다. 이들 지표들을 활용하여 대도시권의 통근 패턴 차이를 밝히고, 이를 통근 정책 수립 과정에서 고려할 수 있기에 지표들 합리적으로 산출하는 것은 매우 중요하다. 그런데, 통근 지표는 일반적으로 행정구역 단위로 산출되기 때문에 공간단위 수정가능성의 문제(MAUP)로부터 자유롭지 못하다는 한계가 있다. 이 문제는 대도시권 간 통근 효율성 비교의 합리성을 저해하기 때문에 통근 지표 산출 과정에서 조심스럽게 다뤄져야 할 필요가 있다. 따라서, 본 연구는 몬테 카를로 시뮬레이션을 활용하여 최적, 실제, 그리고 최대 통근 거리를 산출하고, 이를 통해 초과 통근율과 통근 잠재력 사용률을 제시한다. 몬테 카를로 시뮬레이션을 우리나라의 사정에 맞게 적용하기 위해서, 시뮬레이션에 사용되는 주거지와 근무지가 실제 건물의 위치에서 선택되어야 한다는 제약 조건을 가한 제약조건부 몬테 카를로 시뮬레이션을 실시한다. 2016년 가구통행실태조사 데이터를 이용하여 광역도시계획이 수립된 13개 대도시권을 대상으로 분석을 진행한다. 시뮬레이션을 통해 산출된 통근 지표는 기존 방법을 통해 산출된 결과와 미미한 수준의 차이를 보였다. 대도시권 간 통근 효율성 비교 결과 직주의 물리적 균형의 정도가 유사하더라도 실제 통근 패턴은 상이하게 나타난다는 점이 확인되었다. 향후 면적과 같은 대도시권별 특성을 고려한 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

주제어: 대도시권, 통근 효율성, 공간단위 수정가능성의 문제, 제약조건부 몬테 카를로 시뮬레이션