

# API 기반 통근통행자료를 활용한 서울시 행정동별 승용차 탄소배출량 추정\*

: 네트워크 특성과 공간구조정책 특성을 중심으로

## Estimation of Passenger Private Car Carbon Emissions by Administrative District Using API-based Commuter Data

: Focusing on Network and Spatial Structure Policy Characteristics

고승욱\*\* · 신학철\*\*\* · 이승일\*\*\*\*

Go, Seungwook · Shin, Hakcheol · Lee, Seungil

### Abstract

The purpose of this study was to analyze carbon emissions from passenger cars using Open API as well as examine the effects of socio-economic factors, compact city characteristics, and network characteristics. The following conclusions were obtained. First, research on solving urban transportation problems has limitations in data utilization. Data such as Open API route guidance information should be more widely used in the urban transportation field. Second, converting the spatial structure of Seoul from monocentric to polycentric is necessary. Third, system self-sufficiency must be improved to reduce carbon emissions from passenger cars. Fourth, a land use plan that can accommodate various employment bases should be prepared. If land use is compressed, commuting traffic can become efficient.

**주제어** API, 승용차 통근통행, 탄소배출량, 네트워크, 공간구조정책

**Keywords** Application Programming Interface, Commuting by Private Car, Carbon Emission, Network, Spatial Structure Policy

## 1. 서론

### 1. 연구의 배경과 목적

전 세계적으로 지구온난화로 인해 다양한 분야에서 탄소발생을 저감하기 위한 방안이 논의되고 있다(IPCC, 2021). 국내의 경우 지역별 탄소배출량의 산정 및 추세 파악을 기반으로, 탄소저감을 위해 다양한 분야에서 정책의 수립이 이루어지고 있다. 탄소배출의 대표적인 요인은 건물(건설 및 일상생활), 수송, 산업공정,

폐기물, 기타 부문으로 분류되는데(환경부, 2021), 이 중 수송부문에서 발생하는 탄소의 효과적 저감을 위해서는 개인 단위의 탄소배출량을 산정하고 감소를 위한 정책 수립과 시행이 시급하다. 수송부문에서 개인 단위의 탄소배출량은 도시민의 특성별 도시활동의 수행을 위한 통행에서 발생되며, 도시활동은 도시민이 도시 내에서 일상생활을 위한 필수적인 행동이다(노시학, 1997). 통행은 개인의 사회·경제적 특성과 활동목적(통근·통학, 여가 등)에 따라서 상이하게 나타나기 때문에(고승욱·이승일, 2017), 일괄된 정책을 개인에게 적용하면 비효율적인 결과를 초래하게 된다.

\* 이 논문은 한국연구재단(NRF-2021R1A2C1012039)과 국토교통과학기술진흥원(22CTAP-C163604-02)의 지원을 받아 수행되었음.

\*\* Ph.D. Candidate, Department of Urban Planning & Design, University of Seoul (First Author: gsu0213@uos.ac.kr)

\*\*\* Ph.D., Department of Urban Planning and Design & Department of Smart Cities, University of Seoul (nextlord30@naver.com)

\*\*\*\* Professor, Department of Urban Planning & Design, University of Seoul (Corresponding Author: silee@uos.ac.kr)

현재, 지자체마다 수송부문 탄소배출량을 산정하고, 신규교통수단의 도입, 대중교통이용 활성화, 대중교통중심개발(Transit Oriented Development) 등 다양한 탄소저감을 위한 정책수립에 많은 노력을 기울이고 있다. 그러나 수송부문에서 발생하는 탄소배출 산정량은 지자체 단위(시군구)로 수단의 분류 없이 집계되어 이루어지고 있다. 효과적인 탄소저감 정책을 수립하기 위해서는, 선제적으로 도시 내에서 발생하는 탄소배출량을 미시적인 단위(행정동)로 산정하고 관리해야 할 것이다. 또한, 수송부문에서 효율성과 형평성을 목적으로 하는 공공재인 대중교통과 달리 승용차 통행은 개인 및 가구의 사회·경제적인 특성에 따라 발생하기 때문에(Long et al., 2020), 이를 고려한 탄소배출량 산정이 필요하다. 특히, 서울시는 양호한 도로 인프라와 함께 서울대도시권의 고용중심지로서 승용차 통근통행이 집중되어(통계청, 2021), 서울시 내 수송부문 승용차 탄소배출량을 정확히 측정하고 이에 대한 관리방안 및 정책을 수립해야 한다. 이를 위해서는 무엇보다 발생요인을 정확히 확인하는 것이 중요하다.

또한, 승용차 탄소배출량 발생요인의 규명을 위해 도시 공간의 특성으로서 네트워크 특성과 공간구조정책 특성을 함께 고려해야 한다. 서울시는 다핵공간구조로, 주거지는 서울시 전역에 분포하고 있으나 고용지는 상위 중심지(도심)에 집중되어, 서울시 전역에서 상위 중심지로 향하는 통근통행패턴이 나타나고, 이러한 통근통행은 에너지 문제와 과밀·혼잡 문제 등의 도시문제를 발생시키고 있다. 도시교통 분야에서는 대중교통 이용을 위한 물리적 환경을 개선하고 있으나, 오히려 도심으로 향하는 통근네트워크가 과도하게 집중되어 비효율적인 통근통행이 발생하고 있고(신학철·우명제, 2021), 이는 상위 중심지의 높은 중심성에 기인된 현상으로 승용차 통행 증가로 인해 교통혼잡이 유발된 현상이다(Cervero and Kockelman, 1997). 이와 같은 문제를 해결하기 위한 공간구조정책 중 하나로 압축도시(Compact City)가 제시되었다(Neuman, 2005). 압축도시는 복합적 토지이용을 기반으로, 서로 다른 기능의 다양한 토지이용이 근거리에서 이루어짐에 따라서 통근통행 거리가 감소하게 된다(이경주 외, 2021). 하지만 동일한 압축도시 환경이라도 공간구조특성으로 인해서 통근통행 거리의 증·감은 상이하게 나타날 수 있다. 서울시를 예시로 들면, 대표적인 압축도시 지표로 활용되고 있는 토지이용복합도는 도심권과 신규택지개발지역에서 높게 나타나고 있는데, 고용중심지와 인접한 도심권에서 발생하는 통근목적 통행의 효율성이 증가하나, 일반적으로 도심권에서부터 멀리 분포하고 있는 신규택지개발지역은 토지이용복합도가 높게 나타남에도 불구하고 도시 공간특성에 의해 통근목적 통행의 효율성은 감소할 것이다. 특히, 승용차 통근통행은 개인 및 가구특성에 의한 선택적인 요인(성현곤·손동욱, 2020)과 주거지(출발지)의 공간적 특성(지리적 위치, 대중교통 인프라 등)에 의해 발생된다는 점에 착안하여 네트워크 특성과 공간구조정책 특성을 고려해야 한다. 나아

가, 공간구조정책 특성을 효과적으로 반영하기 위해서는 현재의 공간구조특성을 고려하는 것이 가장 효율적이므로 서울시 내 통근통행이 고용중심지(광화문·강남·여의도 도심, 이하 서울 3도심)에 집중되어 있다는 점을 바탕으로 서울시 424개 행정동으로부터 서울 3도심까지의 승용차수단 통근목적 통행발생량에 대한 분석이 필요하다.

지금까지 도시계획 분야에서는 수송부문 탄소배출량에 직접적인 영향을 미치는 교통에너지 소비요인을 규명하는 연구가 주로 수행되었다. 대표적으로 가구 부문에 대한 연구(노승철·이희연, 2013; 정재원 외, 2015)와 지역 및 도시 공간적 차원에서 교통에너지의 소비 요인을 도출하는 연구(김승남 외, 2009; 이승일, 2010; 김보현 외, 2013)로 구분할 수 있다. 그러나 이런 연구들은 공간구조 특성과 통행수단 유형에 따라 활동특성이 상이하게 발생된다는 점(Gordon and Richardson, 1997; Giuliano and Small, 1993)과 통행목적에 따라서 통행패턴이 다르게 나타난다는 점(Breheny, 1995)을 고려하지 못하여서 인과관계를 설명하는 데 한계를 보이고 있다. 또한, 일부 연구에서는 교통에너지 소비량을 단순히 분석단위별 석유소비량(판매량)으로 정의하였다(안건혁, 2000; 송기욱·남진, 2009). 그러나 도시 내 교통에너지는 출발지에서부터 도착지까지의 이동행위에서 발생되고 출발지의 공간구조특성에 따라 발생요인이 상이하기 때문에(이승일, 2019) 이에 대한 접근이 요구된다. 또한, 이전의 연구들에서는 실제 이동경로인 네트워크 기반 정보 구득이 불가능하다는 연구의 한계점이 존재하였다. 하지만, 최근래 공개된 교통수단별 경로안내 API 정보는 실제 이동경로에 대한 네트워크 거리정보와 실시간 통행 정보를 제공하기 때문에 시간대별 통행목적의 차이를 반영할 수 있어서 활용 가능성이 높은 것으로 알려져 있다(하재현·이수기, 2017). 특히, API 경로 안내 데이터는 기존의 연구에서 활용한 최단거리 기반 통행데이터와는 다르게 차량의 정체를 분석에 포함할 수 있어, 보다 현실적인 통행량을 산출할 수 있다는 장점이 있다.

이 연구에서는 API 경로안내 정보를 활용하여 통근시간대 서울시 424개 행정동으로부터 서울 3도심으로 향하는 통근목적 승용차수단 통행발생량을 기반으로 탄소배출량을 추정하고, 공간구조 특성과 네트워크 특성이 이에 미치는 영향에 대해 실증분석하는 것을 목적으로 한다.

## II. 이론 및 선행연구 고찰

### 1. 교통에너지 소비요인

도시 내 교통에너지는 통행이동거리 및 시간 그리고 통행량에 의해서 산출되며, 탄소배출과 직접적인 관련이 있다(노승철·이희연, 2013). 이에 도시민의 사회·경제적 특성과 도시공간구조에

따라서 교통에너지 소비요인을 규명하는 연구들이 수행되었다. 기존 문헌 검토결과, 가구규모, 가구소득, 연령에 따라서 교통에너지 소비는 지역별로 상이한 것으로 나타났다(노승철·이희연, 2013; 정재원 외, 2015). 특히, 내부통행비율, 개발밀도, 통근거리 및 시간은 교통에너지 소비에 큰 영향을 주는 것으로 확인되었고(김보현 외, 2013), 압축도시로 정의되고 있는 지역일수록 교통에너지 소비가 더 낮게 나타나는 것으로 확인되었다(김리영·서원석, 2011). 이는 대부분의 교통에너지 소비가 통근통행에서 이루어지고 있고(IPCC, 2014), 압축도시를 통한 자족적 고용패턴으로 효율적인 통근통행이 이루어지기 때문이다.

이에 압축도시와 교통에너지 소비와의 연구도 진행되어 왔는데, 조운애(2009)의 연구에서는 압축지표의 객관적 정량화에 대한 한계점을 지적함과 동시에 총인구 밀도와 순인구 밀도를 통해 교통에너지 소비에 미치는 영향에 대해 분석하였다. 분석결과, 순인구 밀도가 높아질수록 교통에너지 소비, 즉 통근거리가 감소하는 것으로 나타나 압축도시를 지향해야 함을 주장하였다. 즉, 압축적인 도시공간구조는 통행자의 이동거리를 감소시키고 교통에너지 소비를 저감할 수 있기 때문이다. Boussauw et al.(2012)는 압축도시의 특성인 밀도 지표와 토지이용의 다양성 등의 변수가 통근거리에 미치는 영향에 대해 분석하였고, 압축특성이 높은 도시일수록 효율적인 통근패턴이 발생하는 것으로 나타났다. 또한, Ewing and Cervero(2010)는 통근거리와 건축환경의 상관관계를 분석하였고, 압축도시의 특징인 밀도, 복합적 토지이용, 교통 접근성이 높은 지역일수록 통근통행이 효율적인 것으로 나타났다. 특히, 교통 접근성 중 대중교통의 접근성은 대중교통 중심의 도시조성 및 연결성으로 승용차 통행의 수요를 저감시키기 때문에, 교통에너지 소비에 대표적인 저감 요인으로 확인되었다(김승남 외, 2009). 이와 같은 차이는 대중교통의 인프라가 잘 구축되어 있는 수도권과 비수도권을 비교분석하는 연구에서도 동일한 결과가 확인되었다(김리영·서원석, 2011).

한편, 과도하게 높은 밀도로 인해, 압축도시의 긍정적인 영향이 상쇄되어 교통에너지 소비가 증가하는 것도 확인되었다. 조운애·최무현(2013)의 연구에서는 과도한 개발밀도는 압축도시의 역효과가 나타날 수 있음을 가정하여 교통에너지를 최소화할 수 있는 적정 개발밀도의 필요성을 주장하였다.

## 2. 통근통행과 도시공간구조

### 1) 통근통행 특성

도시 내 활동은 주거공간에서의 일상생활과 주거지를 벗어난 지역(직장 및 학교, 여가활동 목적지, 상업시설 등)에서의 특정 활동으로 정의되고 있다(Lee et al., 2013; 고승욱 외, 2017). 이러한 도시 내 활동은 인간의 활동을 위한 기본단위인 통행을 바탕으로 이루어지며, 통행의 목적은 다양하지만, 큰 범주에서 '통근

통행'과 '비통근통행'으로 분류할 수 있다. 통근통행은 경제활동에 참여하고 있는 사람들이 주거지로부터 직장으로부터 고정적으로 이루어지는 이동행위를 의미하며, 비통근통행은 통근목적의 통행을 제외한 모든 통행을 의미한다. 즉, 통근통행은 도시 내 도시민이 경제활동을 위해 수행해야 되는 필수적인 행위이며, 경제활동의 생산성과 국민의 삶의 질에 큰 영향을 미친다. 또한, 개인의 삶을 영위하기 위한 기본적인 활동인 통근목적의 통행은 고정적으로 발생하고 있으며, 가구 부문 수송에너지 배출량에서 가장 많은 비율을 차지하고 있다(한국에너지공단, 2019). 통근통행은 도시민의 삶을 영위하기 위한 기본활동임에 따라서 고정적으로 이루어지고 있으므로 통근통행으로 인한 교통에너지 소비에 따른 탄소배출이 고정적으로 발생하고 있다.

이에 과거로부터 국내·외로 통근통행의 패턴을 확인하고 영향요인을 파악하는 연구들이 수행되어 왔다(Giuliano and Small, 1993; Cervero and Kockelman, 1997; 이승일, 2000; 전명진·정명지, 2003; 조운길, 2018; 성현곤·손동욱, 2020). 이 연구들의 결과는 종합적으로, 통근통행 특성의 대표적인 지표로 정의되고 있는 통근시간, 통행량, 통행거리는 사회·경제적 요인과 물리적인 요인에 영향을 받는 것으로 나타났다. 즉, 사회·경제적 요인으로 가구 형태, 소득, 성별, 연령 등에 의해, 도시 및 토지의 압축도, 건물의 연면적, 토지이용 특성, 도시공간구조의 위계에 의한 교통 네트워크, 물리적인 요인 등에 의해 영향을 받는 것으로 확인되었다.

### 2) 도시공간구조가 통근통행패턴에 미치는 영향

교통 네트워크는 장거리 통근통행에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다(조운길, 2018). 이는 교통수단의 발전으로 물리적 거리에 제약을 받지 않는 교통 네트워크가 형성되기 때문이다(김효성·구동희, 2019). 이러한 교통 네트워크는 공간구조 변화의 영향을 받는다(최재현, 2010).

중심지가 하나인 단핵공간구조(〈그림 1〉 참조)는 도시의 중심부인 CBD에 고용기반이 집중되어 있고, 도시 전역에 분포한 주거지에서 CBD로 향하는 교통 네트워크가 형성된다(Bertaud, 2004). 따라서, 단핵공간구조에서는 장거리 통근통행과 더불어 도심으로 집중되는 통근통행으로 과밀·혼잡문제가 발생된다(Bertaud, 2001). 하나 이상의 중심지를 지닌 다핵공간구조는 도시의 혼잡성, 높은 지가를 벗어나 도심외부에 복수의 중심지가 형성되며, 다핵공간구조에서의 중심지는 기능특화로 중심지별로 기능이 다르다.

이에, 중심지는 인근 주거지에 거주하는 도시민들에게 다양한 고용기반을 제공하지 못함으로써, 다핵공간구조는 〈그림 2〉와 같이 출발지 및 목적지가 광범위하게 분포하고, 통근통행은 같이 무작위적인 경향이 나타난다. 다핵공간구조의 총 통행거리는 단핵공간구조에 비해 길 수 있으며, 매우 복잡한 패턴이 나타난다

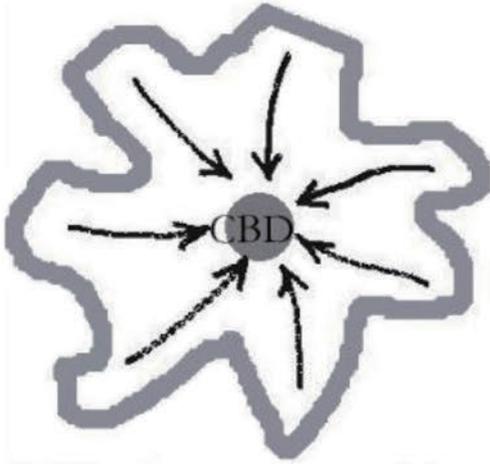


Figure 1. The monocentric model (Bertaud, 2004)

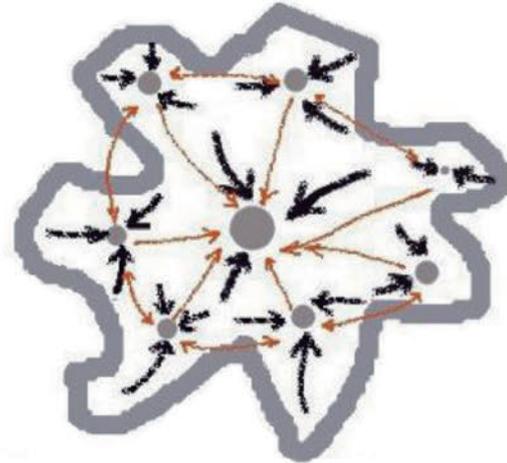


Figure 3. The polycentric model urban village model (Bertaud, 2004)

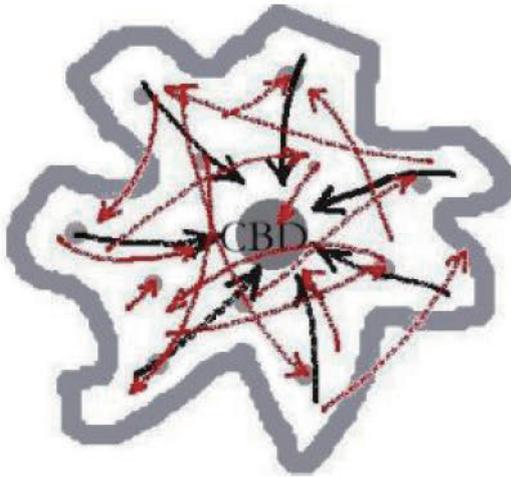


Figure 2. The polycentric model the random movement version (Bertaud, 2004)

(Bertaud, 2001).

한편, 지역 간 네트워크에 기반하여, 도심을 포함하여 모든 중심지들이 규모 및 범위의 경제적 특성이 우수한 다중심공간구조가 존재한다(Curtis, 2008). 다중심공간구조는 중심지별 기능특화가 나타나는 다핵공간구조와는 차별화되는 개념으로 중심지들은 유사한 도시기능을 수행하며(〈그림 3〉 참조), 다양한 직무형태의 고용기반이 존재한다(McMillen and McDonald, 1998; Burger and Meijers, 2012). 이러한 다중심공간구조에서는 통근통행이 이상적으로 형성된다(Van der Laan, 1988; Levine, 1992; Schwanen et al., 2002). 다중심공간구조에서 도심 주변에 거주하는 도시민들은 도심으로 출근하고, 교외도시에 거주하는 도시민들은 교외지역의 중심지로 출근하는 것으로 나타났다(Levine, 1992). Van der Laan(1988)의 연구에서는 다중심구조를 공간적으로 구분하여 공간별 통근패턴을 살펴보았으며, 분석결과, Levine(1992)의 연구와 유사하게 다중심구조에서의 도시민들은 거주지역 인근의 중심지로 통근하고, 공간별 교차통근이 감소하는 것으로 나타났다.

### 3. API 기반 통행자료를 활용한 연구

API(Application Programming Interface)는 정보를 제공하는 주체인 공공·민간기관이 보유하고 있는 정보를 사용자가 쉽게 활용할 수 있게 구축해 놓은 방법 중 하나이다. 특히, 통행자료 중 경로안내 API 정보는 시공간적인 특성을 지니고 있으며, 검색 기준 실제 교통정보를 포함하고 있기 때문에 매우 활용성이 높은 자료이다(하재현·이수기, 2017). 이에, 국내외 연구에서 이를 활용한 연구들이 수행되어 왔다(Wang and Xu, 2011; 하재현·이수기, 2016; 하재현·이수기, 2017; Gao et al., 2019; Costa et al., 2021).

종합적으로, 이 연구들은 기존의 공공기관에서 제공하는 통행자료는 설문조사를 바탕으로 구축되기 때문에 설문대상자의 주관적인 의견(통행시간 입력 시 개인의 보행속도, 피로도 등으로 인한 차이)이 반영된다는 점과 개인정보보호 차원에서 공간단위 정보 제공이 행정구역 단위라는 한계점을 API 기반 통행데이터를 통해서 보다 현실적인 도시교통 특성을 반영할 수 있음을 시사하였다. 특히, Gao et al.(2019)의 연구에서는 가구단위로 설문조사가 이루어진 통행특성조사 자료를 API 기반 데이터와 비교 분석을 통해서, API 기반 데이터가 보다 정확함을 검증하였다. 이는 구글맵(Google Map)에서 제공하는 정보는 실시간 교통정보를 반영하고 사용자의 공간정보를 가장 미시적인 점 단위로 제공이 가능하기 때문이라고 주장하였다. 또한, 국내를 대상으로 한 연구 중 하재현·이수기(2017)는 에스케이 플래닛 터맵(SK Planet Tmap)을 활용하여 서울시 280개 지하철역에서부터 보행시간을 산출하여 분석하였는데, API 기반 통행 데이터를 활용하여 기존 연구들에 비해서 현실적인 여건을 반영할 수 있음을 시사하였다.

#### 4. 연구의 차별성

과거로부터 기후위기에 대응의 일환으로 도시 내 발생하는 수송부문 탄소배출량(또는 교통에너지)과 관련된 연구가 지속적으로 수행되었고, 대다수의 연구들은 도시 내 다양한 특성(인구사회특성, 경제특성, 토지이용특성, 교통특성 등이 수송부문 탄소배출량에 미치는 영향요인을 도출하는 것을 목적으로 연구가 이루어졌다. 이 연구들의 결과를 종합적으로 요약하면, 고정적으로 발생하는 통근통행에 의한 교통에너지는 개인 및 가구 특성과 도시 내 물리적인 여건에 따라 다르게 나타났으며, 물리적인 여건 중 공간구조특성으로서 압축도시 요인이 주요하게 작용하였다. 또한, 도시공간구조에 의해 다양한 통근패턴이 발생하는 것으로 나타났으며, 이는 도시공간구조에 따라 수송부문 탄소배출량의 차이가 발생할 수 있음을 의미한다.

그러나 영향요인을 도출하는 데 있어, 기존 연구들의 경우 도시공간 특성에 따라 수송부문의 탄소배출량이 상이하게 발생된다는 점, 통행목적에 따라서 통행패턴이 다르게 나타난다는 점 등을 종합적으로 고려하지 못하는 한계가 존재한다. 일반적으로 도시 내 통행은 도착지의 공간구조특성에 따라서 각기 다른 통행 특성을 갖고 있고 수송부문 탄소배출량의 요인이 상이하게 나타난다. 특히, 통근시간대 승용차 통행은 토지이용교통 상호작용시스템(Wegener, 1994) 이론하에 출발지(주거지)의 공간구조 특성에 기인하기 때문에, 출발지로부터 수송부문 탄소배출량의 발생 요인을 살펴보는 것이 중요하다. 또한, 통행데이터를 활용하여 수행되어 온 기존의 연구에서는 데이터 구득의 한계점으로 인해서 보다 실제 도시에서 이루어지는 통행특성을 반영하기에는 다소 어려움이 있음을 확인하였다. 이에, 이 연구에서는 API 기반 자료를 사용하여 도시공간구조에 의해 상이하게 나타나는 통근목적 통행을 바탕으로 탄소배출량을 산정하고, 기존 선행연구에서 도출된 탄소배출의 주요 요인이 이에 미치는 영향을 실증분석하였다는 점에 차별성이 있다.

### III. 분석방법론

#### 1. 서울시 행정동별 승용차 수단 통근목적 통행발생량 탄소배출량 추정방법

탄소중립도시(Carbon Net-zero City)는 대기 중의 CO<sub>2</sub> 농도를 궁극적으로 제로화하는 도시로 정의되고 있다(IPCC, 2014). 건물의 용도와 규모(연면적)에 따라서 발생하는 전기 및 열에너지를 저감시키는 정책과 도시민의 활동에 따라서 발생하는 수송 부문 에너지를 대중교통 수단 및 비동력의 이용 활성화를 통한 저감 정책이 대표적이다. 하지만 수송부문 탄소배출량을 효과적으로 저감하기 위해서는 개인 및 가구의 사회·경제적인 특성

에 따라서 고정적으로 발생하는 승용차통근통행의 교통에너지 소비량을 확인하는 것이 필요하다. 현재 국내 수송분야에서 발생하는 총 탄소배출량 산정방법은 한국교통안전공단에서 제공하는 '자동차 1대당 주행거리'와 '자동차 등록대수' 그리고 '온실가스 배출계수'를 바탕으로 산정하고 있다. 여기서, '자동차 1대당 주행거리' 원시자료는 개인정보보호법 등의 제약으로 인해서 활용하기 어렵기 때문에 실제 도시활동으로 인한 탄소배출량의 추정이 필요하다. 이 연구에서는 서울시 424개 행정동으로부터 서울 3도심으로 향하는 승용차수단 통근목적 통행발생량의 탄소배출량을 추정하기 위해서 <그림 4>와 같은 방법을 적용하였으며, 절차 및 데이터 구득방법 그리고 활용데이터는 다음과 같다. 먼저, 연료소비량을 산정하기 위해서 통근통행거리와 승용차연비 정보가 필요한데, 통근통행거리는 SK Planet Tmap Open API 경로안내를 활용하여 오전 첨두시간(07:00~09:00) 동안 424개 행정동 중심지에서 서울시 3도심을 목적으로 하는 통행거리를 구득하였다.

Open API 경로안내는 실시간 교통정보를 제공하기 때문에(하재현·이수기, 2017), 통근시간대 추출을 실행하면 이를 통근목적 통행의 이동거리라고 정의할 수 있다. 구득된 행정동별 통근통행 통행거리를 서울시에서 제공하는 자동차에너지효율분석집 내 승용차 평균연비로 나누어서 각 O-D Pair 연료소비량을 산출하였다. 다음으로는 앞 단계에서 산출된 연료소비량을 바탕으로 교통에너지 소비량을 산정하였는데, 에너지법 시행규칙 제5조 제1항 관련 에너지열량 환산기준을 반영하였다. 이때, 서울시에 등록되어 있는 가솔린, 디젤, 액화석유가스 연료의 승용차가 각 63.5%, 27.2%, 8.6%를 차지하고 전체의 99.3%임에 따라서(국도교통부,

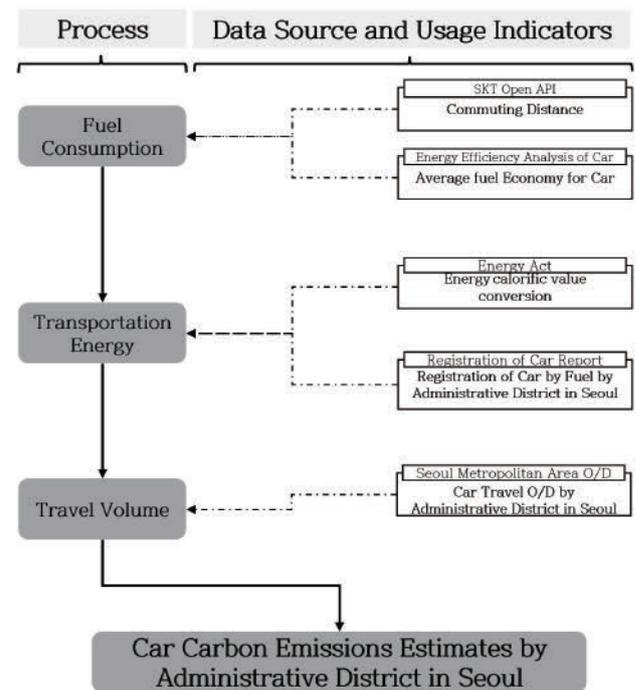


Figure 4. Private car carbon emission estimation method flow

2020), 각 행정동별 연료별 승용차 등록대수 비율을 집계하고, 각 에너지별 환산기준 계수를 적용으로 교통에너지 소비량을 산출하였다. 마지막으로, 산출된 교통에너지 소비량은 승용차 한 대의 기준이므로, 서울시 행정동별 승용차 통근통행에서 발생하는 탄소배출량을 추정하기 위하여 실제 통행량을 적용하였다. 이를 위해 한국교통연구원(KTDB)에서 제공하는 2019년 기준 수도권 여객 O/D 현황화 자료를 활용하였는데, 자료 내에서 사용하는 데이터의 범위에 대한 정의는 다음과 같다. 출발지는 서울시 424개 행정동이고 도착지는 광화문도심, 강남도심, 여의도도심으로 향하는 O-D Pair 중 승용차 수단 통근목적 통행량이다.

## 2. 승용차 통근통행 탄소배출량 영향요인 분석

서울시 행정동별 경제특성, 도시공간구조특성, 네트워크특성이 통근통행목적 승용차 수단 통행발생량 기반 탄소배출량에 어

떠한 영향을 미쳤는지 실증분석하고자 한다. 또한 기존의 연구에서 수행된 실증분석 결과와 비교하여, 추정된 승용차 통근통행 탄소배출량의 타당성을 검증하는 효과를 기대한다. 선행연구 검토를 통해서 확인한 승용차 교통에너지 및 탄소배출량의 발생요인으로는, 통행 행위자인 도시민의 개인 및 가구 특성과 도시민이 활동하는 도시 내 사회·경제적 특성 그리고 공간구조 특성(토지이용특성 및 교통특성) 등이 있다. 그러나 이 연구에서는 서울시 내에서 토지이용이 고밀도로 형성되어 있는 한양도성, 강남, 여의도 도심으로 향하는 통근통행에 대한 탄소배출량 추정량 실증분석이 수행된다는 점과 서론에서 언급한 바와 같이 공간구조에 따라서 네트워크 특성과 공간구조 특성이 상이하게 나타나는 것을 확인하는 것이기 때문에 다음 <표 1>과 같이 변수를 설정하였다.

종속변수는 서울시 행정동별 승용차 통근통행 탄소배출 추정량이다. 독립변수는 경제특성, 공간구조특성, 네트워크특성으로

Table 1. The variables for analysis

Division	Variables	Unit	Method and source			
Dependent variable	Carbon emissions estimates of commuting by private car	-	Car carbon emission estimation method (Figure 4)	Open API (2020.10)		
Independent variables	Economic factor	The average land price of residential	Won	Average land price by administrative district		
		The average land price of commercial				
	Spatial structure factors	Total floor area of residential buildings	m <sup>2</sup>	Total floor area of residential buildings by administrative district	MOLIT (2019)	
		Total floor area of commercial and business buildings		Total floor area of commercial and business buildings by administrative district		
		Urban form factors	Mixed building-use	-		Diversity index $\sum_{i=1}^n x_i^2$
			Spatial structure factors	Worker density		Worker/m <sup>2</sup>
	Worker density squared	Worker Density <sup>2</sup> by administrative district				
	Transport factor	Bus accessibility	The number (of)	Bus station in administrative district	SLG (2019)	
		Subway accessibility		Subway station in administrative district		
	Network factors	3 global centers type (yes:1)	Dummy	Dummy (Yes=1, No=0)	SK_MDIS (2019)	
Commuting network characteristics		%	(CBD Commuting ÷ Total Commuting) by administrative district	KTDB (2019)		
Self-sufficiency		%	(Inbound Traffic Volume ÷ Outbound Traffic Volume) by administrative district			
Average commuting time		Minute	Open API	Open API (2020.10)		

MOLIT: Ministry of Land, Infrastructure, and Transport  
 SLG: Seoul Local Government  
 SK\_MDIS: Statistics Korea MicroData Integrated Service

분류하였으며, 각기 다른 공간마다 상이한 경제적 특성에 따라서 승용차 탄소배출 발생량이 다르게 나타난다는 선행연구(Long et al., 2020)의 결과를 고려하여서 행정동별 주거·상업용도 필지 평균 공시지가를 사용하였다. 다음으로는 압축도시 특성으로 토지이용특성의 규모 및 혼합도는 고밀도를 의미하는 지표로 통근통행 거리를 감소시켜(성현곤, 2014), 이에 교통에너지 저감에 영향을 미친다. 이에 이 연구에서는 주거용건물 연면적과 상업·업무용건물 연면적의 합으로 정의하였다. 또한, 주거, 상업, 업무, 기타 용도의 연면적을 바탕으로 다양성지수를 산출하여 활용하였는데, 고밀도 혼합적 토지이용은 토지이용 효율성 증대로(이경주 외, 2021), 통행량 발생을 감소시킬 수 있기 때문이다. 이와 유사한 개념이자, 종사자 수가 집중되어 있는 고용중심지일수록 통근통행 거리는 감소하여(Rouwendal, 1999), 종사자 밀도와 종사자 밀도 제공항을 활용하였다. 종사자 제공항은 과도한 밀도는 압축도시의 목적에 부정적인 영향을 미칠 수도 있음을 확인하고자 한다. 또한, 압축도시에서 지향하는 대중교통(Neuman, 2005)을 반영하고자 버스 및 지하철 접근도 지표를 구독하였다.

마지막으로 네트워크특성은 도시공간구조와 통근통행패턴 관계를 반영하고자 설정하였는데, 지역특성에 따라 통근네트워크는 상이하게 나타난다는 점(신학철·우명제, 2021)을 고려하기 위해 dummy 형태로 도심권여부 변수를 구독하였다. 통근네트워크 특성과 자속도는 실제 통행량 데이터를 바탕으로 도심으로 향하는 통근통행패턴을 반영하고자 설정하였으며, 통근통행시간은

주거지역(출발지) 내 사업체가 많을수록 통근시간이 감소되는 효과(현준용·김재익, 2014)를 확인하고자 설정하였다. 특히, Open API 데이터는 최근래 시점을 반영하지 못하는 한계점을 보완하여 도시공간구조와 통근패턴을 설명하기 용이하다.

#### IV. 분석결과

##### 1. 서울시 행정동별 탄소배출량 추정결과

이 연구에서 설정한 탄소배출량 추정식을 활용하여 서울시 424개 행정동에서 서울시 도심으로 향하는 통근목적의 승용차 수단 통행발생량을 기반으로 탄소배출량을 산정하였다.

서울시 행정동별 탄소배출량의 평균 및 표준편차는 각 1,129.78, 1,740.63으로 나타났다. 표준편차 값이 평균값보다 크게 나타나는 것은, 추정식을 통해 도출된 통근목적 승용차 탄소배출량이 고르게 분포하고 있지 않음을 의미한다. 즉, 서울시 내 424개 행정동에서 발생하는 탄소배출량은 해당 행정동이 갖고 있는 공간적인 특성에 따라서 다르게 나타나고 있다. 추정된 탄소배출량 상위 10개 행정동은 <표 2>와 같으며, 공간적 분포 특성을 확인하고자 Arc GIS Pro를 활용하여 <그림 5>와 같은 결과를 도출하였다. 이를 종합하여서 해석하면, 서울 도심으로부터의 물리적인 거리(네트워크)가 증가할수록 탄소배출 추정량이 높은 것으로 나타났으며, 직주근접 이론에 일치하는 일반적인 결과이다.

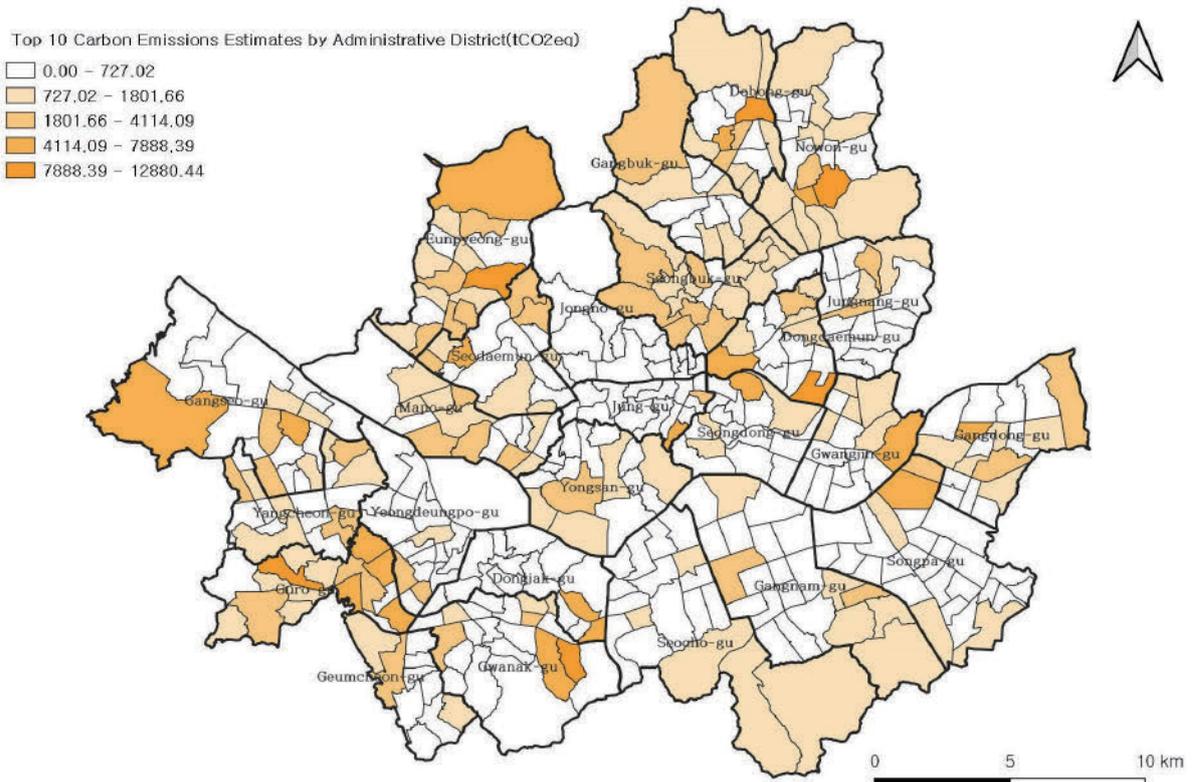


Figure 5. Spatial distribution of carbon emission estimates

**Table 2.** Top 10 carbon emissions estimates by administrative district

Rank	Name		Carbon emissions estimates of commuting by car (tCO <sub>2</sub> eq.)
	County	Administrative district	
1	Dobong-gu	Banghak1-dong	12,880.44
2	Eunpyeong-gu	Nokbeon-dong	11,050.92
3	Dongdaemun-gu	Jangan1-dong	10,166.79
4	Nowon-gu	Hagyedong	9,731.04
5	Guro-gu	Gaebong1-dong	9,583.35
6	Gwanak-gu	Inheon-dong	8,340.99
7	Seongdong-gu	Majang-dong	7,888.39
8	Gwanak-gu	Nakseongdae-dong	7,593.55
9	Jung-gu	Yaksu-dong	7,265.10
10	Guro-gu	Guro3-dong	7,149.91

하지만 광화문 도심과 인접해 있는 중구 약수동은 424개 행정동 중 9번째로 탄소배출 추정량이 높은 지역으로 확인되었는데, 이는 네트워크 특성과 압축도시 특성에 의한 것으로 판단된다. 따라서, 동일한 위계의 공간이어도 공간적 특성이 각기 다르기 때문에(고승욱·이승일, 2017), 이를 규명하는 실증분석이 필요함을 시사한다.

**Table 3.** Descriptive statistics

Division	Variables	N	Unit	Mean	Standard deviation		
Dependent variable	Carbon emissions estimates of commuting by car	424	-	1,132.45	1,743.87		
Independent variables	Economic factor	The average land price of residential	424	Won	27,761.05	18,353.45	
		The average land price of commercial	424		35,491.12	84,541.30	
	Spatial structure factors	Urban form factors	Total floor area of residential buildings	424	m <sup>2</sup>	577,838.44	286,852.50
			Total floor area of commercial and business buildings	424		264,724.85	362,174.94
		Mixed building-use	424	-	0.53	0.14	
		Worker density	424	Worker/m <sup>2</sup>	10,340.08	12,132.47	
		Worker density squared	424	-	253,766,888.72	896,219,998.15	
	Transport factor	Bus accessibility	424	The number (of)	26.31	15.08	
		Subway accessibility	424		0.69	0.82	
		3 global centers type (yes:1)	424	Dummy	0.21	0.41	
		Network factors	Commuting network characteristics	424	%	0.13	0.14
Self-sufficiency	424		%	1.34	513.2		
Average commuting time	424		Minute	41.26	13.24		

## 2. 실증분석결과

### 1) 기술통계

다중회귀분석을 실시하기 전 선정된 변수들을 바탕으로 기술 통계분석을 실시하였고, 결과는 <표 3>과 같다. 이 연구에서의 모형 구성과 목적은 서울시 424개 행정동의 경제요인, 압축도시 특성, 통근네트워크 특성이 도심까지의 승용차 통근통행 탄소배출 추정량에 미치는 영향요인을 밝히는 것이다.

종속변수인 '교통에너지 소비량'과 독립변수 중 '상업·업무용 건물 연면적합계', '종사자 밀도' 및 '종사자 밀도 제곱항' 평균은 각 1,132.45, 264,724.85m<sup>2</sup>, 10,340.08명/m<sup>2</sup>, 253,766,888.72이며 표준편차는 각 1,743.87, 362,174.94m<sup>2</sup>, 12,132.47명/m<sup>2</sup>, 896,219,998.15으로 평균보다 표준편차가 높은 것으로 나타났다. 이는 위 지표들이 특정지역에 집중되어 있음을 의미하며, 도심 및 부도심에 해당되는 행정동이 해당된다.

### 2) 다중회귀모형 분석결과

이 연구에서는 교통에너지를 바탕으로 산정하는 수송부문 탄소배출량에 대해서, 서울시 424개 행정동에서 3도심까지의 승용차 통근통행 탄소배출 추정량을 산정하여 종속변수로 설정하였다. 따라서 교통에너지소비와 관련되어 실증분석을 수행한 선행 연구와 방향성이 유사함을 명시한다.

다중회귀분석결과는 <표 4>와 같으며, 모형의 R-square는 0.349로, 34.9%의 설명력을 갖고 있으며, VIF 값은 10 미만으로 다중공선성은 존재하지 않는다. 설정된 설명변수에서는 경제요인인 주거용 필지의 평균 공시지가와 압축도시 특성 중 주거용건물 연면적 합계, 건물용도 혼합도, 종사자 밀도 제공항 그리고 네트워크 특성 중 3도심 여부, 통근네트워크 특성, 평균 통근시간, 자족도가 유의한 것으로 나타났다. 주거용 필지 평균공시지가는 유의수준 95%에 해당되며, 부(-)의 영향관계로, 선행연구 중 공시지가가 높을수록 가구부문 교통에너지 소비량이 증가하는 경우(노승철·이희연, 2013)와 상반되게 나타났다. 이는 기존의 선행연구에서는 용도지역을 고려하지 않고 분석을 수행하였는데, 일반적으로 공시지가가 높은 상업·업무 중심지역은 도심지역에 분포하고 있어 정(+)의 영향력이 나타난 것으로 해석된다. 반면에, 서울시 내 주거용 필지 평균공시지가 상대적으로 높은 지역은 대부분 서울 3도심과 인접하여 있기 때문에, 출발지로부터 도착지(3도심)까지의 통근거리가 짧아 부(-)의 영향요인이 나타나는 것으로 판단된다.

압축도시 특성 중 주거용건물 연면적 합과 건물용도 혼합도가 각 신뢰수준 95%, 90%에서 정(+), 부(-)의 영향관계를 나타내는 것으로 확인되었다. 주거용건물 연면적 합이 높을수록 해당지역은 주거기능이 강한 지역이므로, 탄소배출 추정량에 정(+)의 영향을 미친 것으로 판단된다. 건물용도 혼합도는 주거, 상업, 업무, 기타 용도의 연면적 비중이 고를수록 혼합도가 높은 지역임을 의미하며, 주거용건물 연면적 합과 상반되는 부(-)의 영향관계가 나타났다. 즉, 서울시 건물 용도기능 중 주거기능은 고르게 분

포하고 있고 업무·상업기능은 서울 3도심에 집중되어 있기 때문에, 해당지역 및 인근지역의 건물 혼합도가 높게 나타났으며, 이는 탄소배출 추정량을 감소시키는 요인으로 작용하였다. 앞서 수행된 선행연구(Boussauw et al., 2012; Ewing and Certero, 2010)의 결과와 부합한 결과이다. 종사자 밀도 제공항은 신뢰수준 99%에서 정(+)의 영향관계가 나타났는데, 과도한 밀도는 탄소배출 추정량의 증가를 유발하는 것으로 판단되며, 조운애·최무현(2013)의 연구와 유사한 결과로 확인되었다.

네트워크 특성 중, 출발지로부터 도심까지의 통근비중을 설명하는 통근네트워크 특성 변수는 신뢰구간 99%에 해당되며 정(+)의 영향관계를 갖는 것으로 분석되었으며, 이는 도심으로 향하는 통근비중이 높을수록 탄소배출량이 증가함을 의미한다. 3도심 여부에 대한 변수는 부(-) 영향관계로 유의수준 95%로 나타났으며, 이는 3도심인 경우 다른 일반 행정동에 비해 탄소배출량이 낮음을 의미한다. 이러한 통근네트워크 특성변수와 3도심 변수의 분석결과는 서울시의 공간구조 특성에 기인된 결과로 다핵공간구조의 특징인 중심지별 기능특화로 인해 중심지 인근에 거주하는 도시민들은 인접한 중심지에서 고용의 기회를 얻지 못함에 따라서, Bertaud(2001)의 연구와 같이 무작위적인 통근네트워크가 발생하여, 탄소배출량이 높은 것으로 해석된다. 이는 탄소배출량 감소를 위해 서울시의 공간구조를 중심지별 기능특화를 특징으로 하는 다핵공간구조에서 다양한 고용기반을 제공하는 다핵다중심공간구조로의 전환 필요성을 시사한다.

자족도와 평균 통근시간은 각 신뢰구간 99%와 90%에서 유의한 변수로 나타났고, 각기 부(-)와 정(+)의 영향관계가 나타났다.

Table 4. Result of multiple regression

Division	Variables	$\beta$	p-value	VIF		
Independent variables	Economic factor	The average land price of residential	-0.084	0.096*	1.695	
		The average land price of commercial	-0.025	0.649	1.445	
	Spatial structure factors	Urban form factors	Total floor area of residential buildings	0.125	0.036**	1.647
			Total floor area of commercial and business buildings	-0.035	0.659	2.976
		Mixed building-use	Mixed building-use	-0.126	0.052*	1.931
			Worker density	-0.147	0.286	8.892
			Worker density squared	0.376	0.006***	8.582
		Transport factor	Bus accessibility	0.064	0.243	1.389
			Subway accessibility	0.031	0.562	1.299
		Network factors	3 global centers type (yes:1)	-0.125	0.031**	1.557
Commuting network characteristics	0.185		0.001***	1.311		
Self-sufficiency	-0.243		0.003***	2.988		
Average commuting time	0.115		0.060*	1.743		
R-square			0.349			

\*p-value <0.1, \*\*p-value <0.05, \*\*\*p-value <0.01

이는 자족도가 높은 행정동과 평균 통근시간이 짧은 행정동인 경우 출발지로부터 근거리에서 위치한 도착지(고용지)로 통근통행 발생량의 비중이 높고 거주지에서 고용의 기회를 얻고 있어, 탄소배출량이 감소함을 의미한다.

종합적으로, 이 모형의 활용 목적은 서울시 행정동별 승용차 통근통행 탄소배출 추정량의 발생요인으로 네트워크 특성과 압축도시특성이 어떻게 나타나는지를 규명하는 것이다. 선행연구와의 비교를 통해 분석결과를 해석함에 있어서 타당성을 존재하는 것을 확인하였고, 이전에 수행되었던 연구에서 확인하지 못했던 네트워크특성이 발생통행 기반 탄소배출량에 영향을 미치는 것을 도출하였다.

## V. 결론

전 세계적으로 기후변화에 대한 관심이 높아짐에 따라, 최근 기후변화에 큰 영향을 미치는 탄소배출량을 감축시키기 위한 정책이 시행되고 있다. 특히, 수송부문 도로운송 수단 내 승용차 통근통행에서 발생하는 탄소배출량의 비중이 높아 이를 관리하고 저감하는 것은 탄소중립도시를 실현하기 위한 중요한 요소이다. 이에, 도시 내에서 발생하는 탄소배출량(교통에너지)의 추정, 발생요인을 도출한 연구들이 진행되었다. 그러나, 기존 문헌 검토 결과, 탄소배출량의 발생요인을 도출하는 데 있어, 도시공간구조 특성, 통행의 목적에 따라 탄소배출량이 다르게 발생하는 점 등을 종합적으로 고려하지 못한 한계점이 존재한다. 이에, 이 연구에서는 도시공간구조 정책을 반영하여 압축도시 특성과 네트워크 특성을 고려하여 해당 요인들이 탄소배출 추정량에 미치는 영향을 실증분석하였고, 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 이 연구에서는 Open API를 활용하여서 실시간 통행정보를 반영한 교통데이터를 구축하여 서울시 424개 행정동에서 서울 3도심으로 향하는 발생통행량을 바탕으로 탄소배출량을 추정하였다. 현재 도시계획 및 교통분야에서는 다양한 방면에서 도시교통문제를 해결하기 위해서 다양한 연구가 수행되고 있다. 하지만, 데이터 구축 및 활용의 한계점으로 인해 제한적인 연구가 수행되고 있는 실정이다. 이 연구에서 추정한 행정동별 탄소배출량의 경우에도, 현재 미시적인 단위에서 탄소배출량에 대한 정보제공이 이루어지고 있지 않는 점과 동일 공간단위에서 통행시간정보는 과거시점의 설문조사 자료만 제공된다는 점의 한계를 보완하고자 사용하였다. 경로안내 Open API 정보와 같이 구축된 데이터는 향후 도시교통 분야에서 활발하게 활용될 수 있음을 시사한다.

둘째, 서울시의 공간구조는 다핵공간구조에서 다중심공간구조로의 전환이 필요하다. 분석결과, 서울시는 강력한 광화문 도심이 존재하나, 상대적으로 강남·여의도 도심의 중심성이 낮아 공간특성별 통근패턴의 차이가 나타났으며, 광화문 도심으로의 통

근네트워크 정도가 높을수록 탄소배출 추정량이 증가하는 것으로 나타났다. 이는 서울시의 공간구조 체계인 다핵공간구조에 의한 것으로 2030 서울플랜에서는 강남·여의도 도심이 광화문 도심의 역할을 분담하고 있으나, 이러한 다핵공간구조는 교차통행을 유발한다. 다핵공간구조는 중심지별 기능특화가 나타나 다양한 고용기반이 부족할 수 있어, 도시민들은 주거지 인근의 중심지로 통근하기보다는 도시민 개인의 고용지가 존재하는 임의의 지역으로 통근하기 때문이다. 반면에 다중심구조는 도시기능 중심산업이 균등히 분배되는 것을 의미하여(Burger and Meijers, 2012), 다양한 고용기반의 형성을 유도할 수 있다. 따라서, 탄소배출량 저감을 위한 도시공간구조 정책의 일환으로 다핵공간구조에서 다핵다중심공간구조로 공간구조체계 전환이 활용될 수 있음을 제시한다.

셋째, 승용차 통근통행에서 배출되는 탄소배출량을 저감시키기 위해서는 자족성 증진이 필요하다. 특히, 경제활동인구 계층을 대상으로 하는 주거정책이 요구된다. 분석결과 지가가 높을수록 탄소배출량이 감소하는 것으로 나타났다. 이는 지가가 높은 지역은 고용중심지이며, 해당지역에 거주하는 도시민은 가까운 고용지로 통근통행 함에 따라 나타나는 현상으로 해석된다. 이에, 도심 인근의 주거개발은 경제활동인구를 대상으로 한 청년주택 등 주택공급을 통한 자족성 증진이 필요함을 시사한다.

넷째, 다양한 고용기반을 수용할 수 있는 토지이용 배치가 이루어져야 한다. 건축물 용도의 혼합도가 증가할수록 탄소배출량이 감소하는 것으로 나타났는데, 이는 다중심공간구조와 관련된 사항으로 건축물 용도의 다양성이 높은 것은 다양한 직무형태의 고용기반이 구축되어 있음을 의미한다. 즉, 토지이용이 압축적으로 이루어진다면 통근통행을 효율적으로 유도할 수 있음을 시사한다.

이 연구의 결과는 향후 탄소중립도시 실현을 위한 도시교통 분야에서 기초자료로 활용되기를 기대하며, 연구의 한계점은 다음과 같다. 이 연구는 서울시 424개 행정동으로부터 서울 3도심까지만의 통근통행을 대상으로 탄소배출량이 추정되어 도심과 부도심에서 통행발생률이 높은 업무용 통행을 비롯한 유발통행의 탄소배출 효과가 배제된 결과이다. 따라서 서울시 전체를 대상으로 한 탄소배출량 추정이 이루어지지 않았다. 또한, 실증분석에서 활용한 종속변수인 행정동별 도심까지의 통근통행목적 승용차 탄소배출 추정량에 대한 검증이 이루어지지 않았다. 검증을 위해서는 추정자료와 검증자료의 공간단위(공간단위)가 일치해야 되는데, 공공에서 제공하고 있는 자료의 공간단위는 서울시 시군구로 제공되는 한계로 인해서 검증을 수행하지 못하였음을 명시한다.

## 인용문헌 References

- 고승욱·김기중·이창효, 2017. “토지이용 특성과 도시활동 잠재력이 여가통행의 연령대별 목적지 선택에 미치는 영향요인 연구: 조건부 로지스틱 회귀모형을 활용하여”, 『서울도시연구』, 18(1): 43-58.  
Go, S.W., Kim, K.J., and Yich, C., 2017. “Influences of Land-use Characteristics and Potential to Urban Activity on Leisure Travel Destination Choice by Age Group Using Conditional Logistic Regression Model”, *Seoul Studies*, 18(1): 43-58.
- 고승욱·이승일, 2017. “통행목적지로서 서울 행정동의 특성이 고령인구 연령대별 비통근 통행에 미치는 영향 분석”, 『한국지역개발학회지』, 29(1): 79-98.  
Go, S.W. and Lee, S., 2017. “A Study on Impact of Characteristics of Destination Districts of Seoul on Non-commuting Travel of Elderly Population by Age Groups”, *Journal of the Korea Regional Development Association*, 29(1): 79-98.
- 국토교통부, 2020. 『2020 자동차 등록현황 보고』.  
Ministry of Land Infrastructure and Transport, 2020. *2020 Total Registered Motor Vehicles*.
- 김리영·서원석, 2011. “압축도시 특성이 지역별 교통에너지 소비에 미치는 영향 분석: 수도권·비수도권간의 차이를 중심으로”, 『한국지역개발학회지』, 23(1): 33-53.  
Kim, L.Y. and Seo, W.S., 2011. “The Impacts of Compact City Characteristics on Transportation Energy Consumptions at Regional Level: The Difference between Sudokwon and Non-Sudokwon Areas”, *Journal of the Korean Regional Development Association*, 23(1): 33-53.
- 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., and 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.
- 김승남·이경환·안건혁, 2009. “압축도시 공간구조 특성이 교통에너지 소비와 대기오염 농도에 미치는 영향”, 『국토계획』, 44(2): 231-246.  
Kim, S.N., Lee, G.H., and Ahn, K.H., 2009. “The Effects of Compact City Characteristics on Transportation Energy Consumption and Air Quality”, *Journal of the Korea Planning Association*, 44(2): 231-246.
- 김효성·구동희, 2019. “우리나라 도시 네트워크의 공간구조 변화”, 『대한지리학회지』, 54(6): 621-636.  
Kim, H.S. and Koo, D.H., 2019. “The Change of Spatial Structure of Urban Networks in Korea”, *Journal of the Korean Geographical Society*, 54(6): 621-636.
- 노승철·이희연, 2013. “가구 부문의 에너지 소비량에 영향을 미치는 요인분석”, 『국토계획』, 48(2): 295-312.  
Noh, S.C. and Lee, H.Y., 2013. “An Analysis of the Factors Affecting the Energy Consumption of the Household in Korea”, *Journal of the Korea Planning Association*, 48(2): 295-312.
- 노시학, 1997. “서울시 노령인구의 통행패턴 분석”, 『한국노년학』, 14(2): 1-16.  
Noh, S.H., 1997. “An Analysis of the Travel Patterns of the Elderly in Seoul”, *Journal of the Korea Gerontological Society*, 14(2): 1-16.
- 성현곤, 2014. “주거지 건조환경과 보행활동과의 비선형 연관성 진단: Jacobs의 삶에 기반한 물리적 환경의 보행목적별 차이를 중심으로”, 『국토계획』, 49(3): 159-174.  
Sung, H., 2014. “Diagnosis on the Non-linear Association of Built Environment with Walking Activity in Residential Areas: Focused on the Difference of Walking Purposes for Physical Environment based on Jacobs’ Life”, *Journal of Korea Planning Association*, 49(3): 159-174.
- 성현곤·손동욱, 2020. “통근에서 승용차의 수단선택과 통행시간의 숨겨진 효과: 개인, 가구, 거주지역의 다수준 결정요인을 중심으로”, 『국토계획』, 55(1): 54-68.  
Sung, H. and Sohn, D.W., 2020. “Private-Car Mode Choice in Commuting and Its Hidden Impacts on the Travel Time: Focused on the Multilevel Determinant Measures of Individual, Household, and Residential Area”, *Journal of Korea Planning Association*, 55(1): 54-68.
- 송기욱·남진, 2009. “압축형 도시특성요소가 교통에너지 소비에 미치는 영향에 관한 실증분석”, 『국토계획』, 44(5): 193-206.  
Song, K.W. and Nam, J., 2009. “An Analysis on the Effects of Compact City Characteristics on Transportation Energy Consumption”, *Journal of Korea Planning Association*, 44(5): 193-206.
- 신학철·우명제, 2021. “압축지표와 통근 네트워크가 통근시간에 미치는 영향에 관한 연구: 수도권 경기·인천 지역을 대상으로”, 『지역연구』, 37(2): 49-61.  
Shin, H. and Woo, M., 2021. “The Impact of Compact City Indicators and Commuting Network on Commuting time: Focused on Suburban Cities in the Seoul Metropolitan Area”, *Journal of the Korean Regional Science Association*, 37(2): 49-61.
- 안건혁, 2000. “도시형태와 에너지활용과의 관계 연구”, 『국토계획』, 35(2): 9-17.  
Anh, K.H., 2000. “A Study on the Corelation between Variables of Urban Form and Energy Consumption”, *Journal of Korea Planning Association*, 35(2): 9-17.
- 이경주·박진호·임은선, 2021. “건물 데이터를 이용한 국내 도시 의도지이용 압축도 측정에 관한 연구”, 『국토연구』, 111: 3-23.  
Lee, G., Park, J., and Im, E., 2021. “Measuring Land Use Compactness of Cities in Korea Using Building Registry Data”, *The Korea Spatial Planning Review*, 111: 3-23.
- 이승일, 2000. “交通發生低減을 위한 環境親和的 都市空間構造研究”, 『국토계획』, 35(6): 21-33.  
Lee, S., 2000. “A Study on Sustainable Urban Forms for Enhancing Traffic Avoidance: The Case of the Kwangju Metropolitan Area”, *Journal of the Korea Planning Association*, 35(6): 21-33.
- 이승일, 2010. “저탄소·에너지절약도시 구현을 위한 우리나라 대도시의 토지이용-교통모델 개발방향”, 『국토계획』, 45(1): 265-281.

- Lee, S., 2010. "Development Scheme of a Land-Use Transport Model for Korea's Large Cities toward a Low-Carbon-Energy-Saving City", *Journal of the Korea Planning Association*, 45(1): 265-281.
18. 이승일, 2019. 「스마트 도시계획」, 서울: 커뮤니케이션북스.  
Lee, S.I., 2019. *Smart Urban Planning*, Seoul: Communication-Books.
19. 전명진·정명지, 2003. "서울대도시권 통근통행 특성변화 및 통근거리 결정요인 분석: 1980~200년의 변화를 중심으로", 「국토계획」, 38(3): 159-173.  
Jun, M.J. and Jeong, M.J., 2003. "Analysis on Commuting Pattern Change and Its Determinants in Seoul Metropolitan Area", *Journal of the Korea Planning Association*, 38(3): 159-173.
20. 정재원·이창효·이승일, 2015. "서울시 행정동별 가구의 에너지 소비량에 영향을 미치는 요인의 통합적 분석", 「국토계획」, 50(8): 75-94.  
Jung, J., Yich, C., and Lee, S., 2015. "An Integrative Analysis of the Factors Affecting the Household Energy Consumption in Seoul", *Journal of the Korea Planning Association*, 50(8): 75-94.
21. 조운길, 2018. "가구유형에 따른 통근통행 특성: 대중교통지향형 주택공급 정책을 중심으로", 석사학위논문, 서울대학교 대학원.  
Cho, Y., 2018. "The Characteristics of Commuting by House Type: Based on Transit Oriented Housing Supply Policy", Master's Dissertation, Seoul National University.
22. 조운애, 2009. "압축도시와 교통에너지소비의 관계에 대한 실증연구: 7대 광역도시를 중심으로", 「한국사회와 행정연구」, 19(4): 113-132.  
Joe, Y.E., 2009. "Empirical Study on the Relationship between Compact City and Transportation Energy Consumption: The Case of 7 Metropolitan Cities", *Korean Society and Public Administration*, 19(4): 113-132.
23. 조운애·최무현, 2013. "압축도시와 적정 개발밀도에 관한 실증연구: 74개 광역시 자치구를 중심으로", 「지방정부연구」, 17(3): 47-66.  
Joe, Y.E. and Choi, M.H., 2013. "Empirical Study on the Optimum Urban Density for 74 Autonomous Districts of the Metropolitan Cities", *The Korean Journal of Local Government Studies*, 17(3): 47-66.
24. 최재현, 2010. "한국 도시 성장의 변동성 분석", 「한국도시지리학회지」, 13(2): 89-102.  
Choi, J.H., 2010. "Instabilities in the Korean Urban Population Growth", *Journal of the Korean Urban Geographical Society*, 13(2): 89-102.
25. 통계청, 2021. 「2020 인구주택총조사 표본 집계 결과: 인구 특성 항목」.  
Statistics Korea, 2021. *2020 Population and Housing Census Sample Results: Population Characteristics*.
26. 하재현·이수기, 2016. "API 경로안내 정보를 활용한 대중교통 서비스 취약지 분석: 서울시 고용 중심지로의 이동성을 중심으로", 「국토계획」, 51(5): 163-181.  
Ha, J. and Lee, S., 2016. "An Analysis of Vulnerable Areas for Public Transit Services using API Route Guide Information: Focused on the Mobility to Major Employment Centers in Seoul, Korea", *Journal of Korea Planning Association*, 51(5): 163-181.
27. 하재현·이수기, 2017. "보행자 경로안내 API정보를 활용한 대중교통 접근성 영향요인 분석: 서울시 지하철역 보행 접근성을 중심으로", 「국토계획」, 52(3): 155-170.  
Ha, J. and Lee, S., 2017. "Analysis of Influential Factors to Public Transportation Accessibility using Pedestrian Route Guide API Information Service: Focused on Walking Accessibility to Subway Station in Seoul, Korea", *Journal of the Korea Planning Association*, 52(3): 155-170.
28. 한국에너지공단, 2019. 「2019 전 부문 에너지사용 및 온실가스 배출량 통계」.  
Korea Energy Agency, 2019. *2019 All Sectors Energy and GHG Emission Statistics*.
29. 현준용·김재익, 2014. "대중교통이용률과 직주균형 수준이 통근통행에 미치는 영향", 「교통연구」, 21(4): 17-32.  
Hyun, J.Y. and Kim, J.I., 2014. "The Effects of Transit-Share and Job-Housing Balance on Commuting Travel", *Journal of Transport Research*, 21(4): 17-32.
30. 환경부, 2021. 「환경백서 2021」.  
Ministry of Environment, 2021. *2021 White Paper of Environment*.
31. Bertaud, A., 2001. *Metropolis: A Measure of the Spatial Organization of 7 Large Cities*, Unpublished Working Paper, 1-22.
32. Bertaud, A., 2004. *The Spatial Organization of Cities: Deliberate Outcome or Unforeseen Consequence?*, Institute of Urban and Regional Development University of California at Berkeley, Unpublished Working Paper, 1-32.
33. Boussauw, K., Neutens, T., and Witlox, F., 2012. "Relationship between Spatial Proximity and Travel-to-work Distance: The Effect of the Compact City", *Regional Studies*, 46(6): 687-706.
34. Breheny, M., 1995. "The Compact City and Transport Energy Consumption", *Transactions of the Institute of British Geographers*, 20(1): 81-101.
35. Burger, M. and Meijers, E., 2012. "Form Follows Function? Linking Morphological and Functional Polycentricity", *Urban Studies*, 49(5): 1127-1149.
36. Cervero, R. and Kockelman, K., 1997. "Travel Demand and The 3Ds: Density, Diversity, and Design", *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2(3): 199-219.
37. Costa, C., Ha, J., and Lee, S., 2021. "Spatial Disparity of Income-weighted Accessibility in Brazilian Cities: Application of a Google Maps API", *Journal of Transport Geography*, 90: 102905.
38. Curtis, C., 2008. "Planning for Sustainable Accessibility: The Implementation Challenge", *Transport Policy*, 15(2): 104-112.
39. Ewing, R. and Cervero, R., 2010. "Travel and the Built Environment: A Meta-analysis", *Journal of the American Planning Association*, 76(3): 265-294.
40. Gao, G., Wang, Z., Liu, X., Li, Q., Wang, W., and Zhang, J., 2019. "Travel Behavior Analysis Using 2016 Qingdao's Household Traffic Surveys and Baidu Electric Map API Data", *Journal of Advanced Transportation*, 2019: 6383097.

41. Giuliano, G. and Small, K.A., 1993. "Is The Journey to Work Explained by Urban Structure?", *Urban Studies*, 30(9): 1485-1500.
42. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2014. *IPCC Fifth Assessment Report*.
43. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021. *The Physical Science Basis*.
44. Lee, S., Yi, C., and Hong, S., 2013. "Urban Structural Hierarchy and the Relationship between the Ridership of the Seoul Metropolitan Subway and the Land-use Pattern of the Station Areas", *Cities*, 35: 69-77.
45. Levine, J.C., 1992. "Decentralization of Jobs and Emerging Suburban Commute", *Transportation Research Record*, 1364: 71-80.
46. Long, Y., Huang, D., Lei, T., Zhang, H., Wang, D., and Yoshida, Y., 2020. "Spatiotemporal Variation and Determinants of Carbon Emissions Generated by Household Private Car", *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 87: 102490.
47. McMillen, D.P. and McDonald, J.F., 1998. "Suburban Subcenters and Employment Density in Metropolitan Chicago", *Journal of Urban Economics*, 43(2): 157-180.
48. Neuman, M., 2005. "The Compact City Fallacy", *Journal of Planning Education and Research*, 25(1): 11-26.
49. Rouwendal, J., 1999. "Spatial Job Search and Commuting Distances", *Regional Science and Urban Economics*, 29(4): 491-517.
50. Schwanen, T., Dieleman, F.M., and Dijst, M., 2002. "The Impact of Metropolitan Structure on Commute Behavior in the Netherlands", Utrecht University.
51. Van der Laan, L., 1998. "Changing Urban Systems: An Empirical Analysis at Two Spatial Levels", *Regional Studies*, 32(3): 235-247.
52. Wang, F. and Xu, Y., 2011. "Estimating O-D Travel Time Matrix by Google Maps API: Implementation, Advantages and Implications", *Annals of GIS*, 17(4): 199-209.
53. Wegener, M., 1994. "Operational Urban Models: State of the Art", *Journal of the American Planning Association*, 60(1): 17-29.

Date Received	2022-09-06
Reviewed(1 <sup>st</sup> )	2022-12-05
Date Revised	2023-01-31
Reviewed(2 <sup>nd</sup> )	2023-02-08
Date Accepted	2023-02-08
Final Received	2023-02-09