



도시형태가 통행행태에 미치는 영향 메타분석*

The Impact of Urban Form on Travel in Korea: A Meta Analysis

송재민**

Song, Jaemin

Abstract

Spatial planning is a powerful policy tool for reducing greenhouse gas emissions since the urban form affects travel behaviors. However, despite large numbers of previous studies on the effects of urban form characteristics on travel in Korea, the directions and magnitudes of the effects have been inconsistent. Against this backdrop, this study presents a meta-analysis to comprehensively synthesize results from previous research published in Korea from 2000 to May 2021 and determines the magnitude and direction of impact. Academic papers were collected for the analyses by combining the keywords "city," "form," "pass," "density," and "traffic energy" using the Research Information Sharing Services website (www.riss.kr). Following a three-step screening process, twenty-four papers were finally selected and analyzed. The analysis results indicate that the impact direction of urban form characteristics, such as density, diversity, public transport accessibility, and intersection density, generally agree with the observations in previous literature. However, in terms of the impact size, population density has the most significant effects on private cars, public transportation, and non-motorized travel in Korea. These results necessitate an urgent preemptive response in spatial planning to induce compact growth, especially in non-capital regions where the population is declining rapidly.

주제어 도시형태, 통행행태, 메타분석
Keywords Urban Form, Travel Behavior, Meta Analysis

1. 연구의 배경 및 목적

탄소중립(carbon neutrality)은 현재 최근 전 세계적으로 가장 중요하고 시급한 국가 및 지역 정책 어젠다이다. 인류는 산업화 이후에 화석 연료에 기반한 경제성장 및 소비 생활을 이어나가 왔고, 이로 인해 현재 글로벌 차원의 기후변화 위기를 당면하고 있다. 현재, 대기 중의 이산화탄소 농도는 지난 200만 년 이래 가장 높은 수치를 보이고 있으며, 지난 5년간의 기온은 1850년 이후 최고치를 기록하고 있다(IPCC, 2021). 기후변화는 모든 지역에 걸쳐 이상기후를 야기하고 있으며, 이상기후의 빈도 및 규모는 빠르게 증가하고 있다(IPCC, 2021). 기후변화는 현재 지구가 당

면하고 있는 가장 심각한 위기로, 세계경제포럼은 매년 발표하는 글로벌 위험 보고서(World Economic Forum, 2021)에서 이상 기후와 기후변화 행동 변화 실패를 현재 지구가 당면하고 있는 가장 큰 위험으로 꼽고 있다. 글로벌 차원에서는 이와 같은 기후변화 위기를 저감하고 선제적으로 대응하고자 파리협정을 체결하고, 2100년까지 지구의 평균 기온 상승 폭을 산업화 이전 대비 2°C 이하, 더 나아가 1.5°C 이하로 제한하고자 하는 목표를 수립하였다. 한편, 개별 국가 차원에서도 작년 우리나라의 2050년 탄소중립 선언을 포함하여, 영국, 프랑스, 캐나다, 중국, 일본, 핀란드, 남아공, EU 등이 탄소중립 목표를 선언한 바 있다(2050 탄소중립 포털, 2021). 이와 같은 탄소중립 달성을 위해서는 에너지,

* 이 연구는 서울대학교 신입교수 연구정착금으로 지원되는 연구비에 의하여 수행되었음.

** Associate Professor, Graduate School of Environmental Studies, Seoul National University (Corresponding Author: jaemins@snu.ac.kr)

산업, 수송, 빌딩 등 전 부문에 걸쳐 강력한 탈탄소화(deep decarbonization)이 필수적이다.

도시는 국가와 지구적 차원의 탄소중립을 달성하기 위해서 가장 중요한 거주 공간이다. 왜냐하면 도시는 인구 규모, 산업 및 소비 활동, 에너지 사용이 밀집된 장소로서 국가 온실가스의 직접 및 간접 주요 배출원이기 때문이다(Churkina, 2016). 도시에서의 온실가스 배출은 에너지, 교통, 건물 부문 등에서 발생하는데, 도시별 온실가스 배출 특성은 도시의 인구, 사회경제적, 공간 형태 및 인프라 특징 등에 따라 다양하다(Seto et al., 2014). 그중에서도 교통부문의 온실가스는 우리나라 전체 온실가스 배출의 약 14%, 서울시의 경우에는 약 18% 차지하고 있어 기후변화 저감에 매우 중요한 부문이라 할 수 있다(환경부, 2020). 교통부문에서 배출되는 온실가스를 근본적으로 저감하기 위해서는 도시 및 지역 공간 전략이 매우 중요하다. 왜냐하면, 도시공간구조는 통행 시간 및 거리, 통행량, 통행 수단의 선택 등 통행과 밀접한 관계가 있고, 통행은 교통에너지 수요와 관련이 있기 때문이다. 또한, 공간계획은 온실가스 저감을 통한 기후변화 완화(mitigation)뿐만 아니라 적응(adaptation)과 저탄소 전환을 가능하게 하며, 특히 장기적인 이산화탄소 배출을 컨트롤할 수 있는 매우 강력한 근본적 배출 저감 도구이다(Seto et al., 2014; Zhang et al., 2021).

기후변화 저감 전략으로서 공간계획 및 정책을 수립하고 이행하기 위해서는 어떠한 도시형태가 교통에너지 저감에 효과적인지 또 얼마만큼의 영향을 주는지에 대한 면밀한 분석이 필요하다. 하지만 공간 특성이 통행에 미치는 영향은 그 측정이 쉽지 않다. 왜냐하면 공간 특성이 통행에 미치는 영향이 직접적이기보다는 간접적인 경우가 많고, 공간 특성의 단일 효과만 측정하는 것이 매우 어렵기 때문이다(Salon et al., 2012). 또한, 변수 및 방법의 선택, 지역에 따라 공간 형태의 영향이 다르게 도출될 수 있기 때문이다(Ewing and Cervero, 2010). 우리나라에서도 도시 형태 중 특히 밀도, 토지이용 다양성, 연결성, 접근성, 대중교통 등이 통행 행태에 미치는 영향에 대한 실증연구가 서울 및 수도권, 전국 차원에서 다양하게 이루어져 왔지만, 연구에 따라 이와 같은 주요 도시형태 특성 요인들이 통행에 미치는 영향의 방향 및 크기 결과는 일관되지 않게 나타났다. 따라서, 우리나라에 효과적인 공간구조 전략 도출을 위해서는 적절한 통계 기법을 활용하여 기존 연구결과를 통합적으로 검토해 볼 필요가 있다.

이와 같은 배경에서 본 연구는 우리나라에서 2000년도부터 2021년 5월까지 발표된 논문들을 대상으로 공간구조가 통행에 미치는 영향에 관한 정량 분석 논문들을 통합적으로 분석하는 메타 분석을 실시하여 영향의 크기 및 방향을 규명하고자 한다. 메타분석은 다수의 독립적인 연구결과를 일반화, 종합하여 제시할 수 있는 장점이 있으며, 사회과학분야(서미옥, 2011), 의학분야(강현, 2015), 도시계획 분야(Ewing and Cervero, 2010; Salon et al., 2012) 등 다양한 학문 분야에서 널리 활용되고 있는 방법론이다.

본 연구에서는 Ewing and Cervero(2010)의 연구방법론을 차용하여 도시형태 특성이 통행에 미치는 영향 크기 비교를 위해 탄력성을 공통지표로 사용하였으며, 탄력성 도출이 가능한 연구 방법 및 데이터가 제시된 논문들을 수집하고 분석하여 도시형태가 통행에 미치는 영향을 종합적으로 검토하였다.

II. 이론 및 선행연구 검토

1. 도시형태가 통행에 미치는 영향

공간의 물리적 형태는 통행수요 및 통행 거리와 매우 밀접하게 연관되어 있다. 특히, 그중에서도 밀도(density), 토지이용 다양성(diversity), 연결성(design/connectivity), 대중교통 접근성(distance to transit) 및 접근성(destination accessibility) 등의 공간 특성은 상호 연관되어 있으며 통행과 관련된 에너지 및 온실가스 배출에 미치는 영향이 크다(Seto et al., 2014; Ewing and Cervero, 2010). 이와 같은 주요한 도시형태 지표들은 “D 변수(variable)”로 일컬어지며 도시공간형태를 측정하는 지표로서 널리 활용되고 있다.

도시의 밀도는 인구, 고용, 주택 등 관심 대상에 따라 블록, 지구, 도시, 지역 및 국가 등 다양한 공간 위계에서 측정될 수 있다. Seto et al.(2014)는 밀도가 두 가지 매커니즘을 통해 통행에 영향을 미치는 것으로 설명하고 있다. 첫째는, 분절되고 저밀화된 고용, 주거, 상업 개발은 통행수요를 증가시키며, 둘째로는 저밀로 인해 에너지 효율적, 대중교통 및 비동력 통행이 어렵다는 점이다. 따라서 고밀도는 통행거리를 줄이고 대중교통 및 비동력 통행수요를 증가시켜 교통부문 온실가스 배출을 낮추는 역할을 한다.

도시의 토지이용 다양성은 다양한 기능의 토지이용이 근접하게 되어 출발지와 목적지 간의 거리를 줄이는 데 기여한다(Kockelman, 1997; Cervero and Kockelman, 1997). 토지이용혼합은 다양한 지표들로 측정되는데 대표적으로, 가구 대비 일자리 수, 상업과 주거 비율(Seto et al., 2014; Ewing and Cervero, 2010) 등으로 측정된다. 우리나라의 경우에도 직주혼합도(김보현 외, 2013; 김희철·안건혁, 2011; 민병학 외, 2016), 토지용도 다양성 정도를 측정하는 엔트로피 지수(민병학 외, 2016; 김희철 외, 2014) 등이 활용되고 있다.

접근성은 일반적으로 출발지와 목적지 간의 물리적인 근접성(proximity)과 도달하기까지 걸리는 시간을 모두 고려한 특성을 의미한다(Seto et al., 2014). 따라서, 우수한 접근성을 가진 지역의 경우 통행 거리 및 시간이 모두 낮은 특성을 가진다. 접근성은 목적지에 따라 일자리로의 접근성(김희철·안건혁, 2011), 도심로의 접근성(이건원 외, 2014), 상업시설로의 접근(김희철 외,

2014), 대중교통 접근성(성현곤·추상호, 2010; 이진원 외, 2014; 김희철 외 2014) 등이 주요한 지표로 활용되고 있다.

가로 밀도 및 디자인으로 측정되는 도시의 연결성은 일반적으로 보행과 밀접한 관계가 있다. 연결성이 좋을수록, 즉 블록의 크기가 작을수록 이동해야 하는 거리가 짧고 또한 보행하기에 편리하기 때문이다(Seto et al., 2014). 연결성은 도로 네트워크와 관련이 깊어 간선도로 비율 및 밀도(김경태·송재민, 2015; 김리영·서원석, 2011; 성현곤·추상호, 2010), 교차로밀도(이진원 외, 2014; 성현곤·추상호, 2010, 김문현 외, 2019, 성현곤 외, 2014b) 등으로 측정된다.

우리나라를 대상으로 도시형태 특성이 통행에 미치는 연구는 그동안 활발하게 이루어져 왔다. 실증연구는 대상지에 따라 서울시(고은정·이경환, 2013; 곽은미 외, 2013; 김문현 외, 2019; 김희철 외, 2014; 김희철·안건혁, 2011; 민병학 외, 2016; 성현곤, 2017; 성현곤 외, 2014b), 수도권(권성문·김성연, 2020; 성현곤 외, 2013; 성현곤·추상호, 2010; 성현곤·손동욱, 2020), 전국(김경태·송재민, 2015; 김보현 외, 2013; 성현곤 외, 2014a; 이창효 외, 2014) 및 특정 시(김리영·서원석, 2011; 서민호·김세용, 2011; 서승연 외, 2014, 조운애, 2009) 등으로 크게 구분될 수 있다. 도시형태 특성이 통행에 미치는 영향은 연구에 따라 그 크기나 방향성에 있어 다양한 결과값이 도출되었는데, 이에 관한 자세한 분석은 본 연구의 결과 분석에서 다루고 있다.

2. 공간구조와 통행 메타분석

메타분석은 연구대상, 측정, 자료처리 및 분석방법 등이 상이한 연구들로부터 도출된 결과들을 종합적으로 분석하여 결론을 도출하는 연구 방법으로 다양한 학문 분야에서 널리 활용되어왔다. 메타분석은 도시계획 분야 및 본 연구의 관심 주제인 도시형태 특성이 통행에 미치는 영향을 규명하는 다수의 연구에서도 주요한 연구 방법으로 활용되어왔다.

우선, Seto et al.(2014)는 IPCC 제5차 보고서에서 기존 메타분석에서 도출된 자료를 기반으로 밀도, 토지이용 다양성, 연결성, 접근성이 통행에 미치는 영향을 분석하여 제시하였다. 기존 연구를 비교 분석한 결과 미국 도시들의 경우 밀도나 토지이용 다양성에 비해 도로 네트워크 특성인 연결성이 통행거리에 미치는 영향이 가장 크게 도출되었다.

Leck(2006)는 40개의 논문을 분석하여 도시 공간 특성 요인이 통행에 미치는 영향을 분석하였다. Leck(2006)의 연구는 평균 영향 크기를 도출하지는 않았으나, 거주지 밀도와 복합토지이용이 통행에 영향을 미치는 중요한 변수임을 통계적으로 보여주고 있다. 한편 Leck(2006)의 연구에서 가로 패턴은 통계적으로 중요하지 않은 것으로 도출되었다.

Ewing and Cervero(2010)는 도시공간 특성이 통행에 미치는

영향 크기를 도출하기 위해 50여 개의 실증연구들을 수집하여 분석하였다. 각기 다른 모델을 사용한 실증연구들에서 도출된 영향 크기를 동일한 잣대로 비교분석하기 위해 탄력성이 공통 지표(common metrics)로 사용되었으며, 탄력성 계산이 가능하지 않은 모형이나 데이터가 제시되어 있지 않은 연구들은 제외하고 분석이 이루어졌다. 본 연구에서는 D 변수라고 일컬어지는 밀도, 다양성, 도시디자인, 대중교통까지의 거리 등이 통행 거리, 보행, 대중교통 이용에 미치는 영향의 평균 크기를 산출하여 비교하였다. 분석 결과, 모든 변수의 영향은 비탄력적으로 탄력성 절댓값 크기는 1보다 작게 나타났으며, 직장 접근성의 평균 탄력성이 -0.22로 통근거리에 가장 영향을 크게 미치는 변수로 도출되었다.

Salon et al.(2012)는 데이터 특성, 전후 비교, 비교집단 여부, 통근거리 데이터 사용, 효과 분석 데이터 존재 여부 등 6가지의 조건을 만족하는 연구들을 수집하여 공간 전략을 포함한 다양한 도시 전략들이 통근거리에 미치는 영향 크기를 탄력성 값으로 비교 분석하였다. 도시공간 특성 변수 중 가장 널리 활용되는 변수는 주거 밀도였으며, 밀도는 다른 공간 특성 변수들과 밀접하게 연관이 있는 것으로 나타났다. 메타분석 결과 Salon et al.(2012)는 도시공간 전략들이 통행거리에 영향을 미치는 것은 분명하나 그 영향 크기는 연구에 따라 상이하여 이에 대한 후속 연구 필요성을 제시하고 있다.

한편, Zhang et al.(2021)의 연구는 통계적 기법을 사용하는 메타분석이 아닌 체계적 문헌 고찰(systematic literature review)를 수행하여 2005년부터 2020년까지 공간계획 요소가 이산화탄소 배출에 미치는 요인에 관한 70여 개의 논문을 분석하고, 주요 요인들 간의 직접 및 간접 효과를 규명한 연구이다. 본 연구에서는 온실가스 배출에 영향을 미치는 7가지 주요 요소로서 도시 패턴(크기, 컴팩트 등), 단핵/다핵 구조, 밀도, 토지이용, 교통인프라, 대중교통, 공공서비스 시설을 식별하고, 이를 도시형태, 토지이용 및 건조환경의 3가지 부문으로 구분하여 비교 분석하였다. Zhang et al.(2021)은 선행연구들의 연구결과를 기반으로 주요 요소 간 한 방향 또는 양방향의 상호 작용을 나타내는 이론 모형을 도식화하고, 메트로 차원의 도시형태, 메조 차원의 토지이용, 마이크로 차원의 건조환경 간 상호 작용을 고려하는 공간 정책이 필요함을 강조하고 있다.

우리나라의 경우 김승남(2013)이 우리나라에서 1990년에서 2010년까지 발표된 실증연구를 대상으로 체계적 문헌 고찰(systematic literature review)을 통해, 도시형태 특성이 통행에 미치는 영향을 분석하였다. 본 연구에서는 도시형태 및 공간구조 변수가 통행 행태, 통행패턴, 교통에너지 및 대기오염에 미치는 영향을 검토하였으며, 분석 결과 주요 변수의 영향이 연구결과에 따라 양의 영향 또는 음의 영향으로 도출되어 합치된 결과를 보여주고 있는 경우가 매우 소수임을 확인하였다. 본 연구결과 중 비교적 동일한 결과가 도출된 것은 밀도와 접근성의 영향이다. 우

선, 밀도는 대중교통 및 비동력 선택확률을 높이며, 교통에너지 소비를 줄이는 데 기여하는 것으로 도출되었으며, 도심 접근성 및 대중교통 접근성은 대중교통 선택에 긍정적 영향을 미치는 것으로 도출되었다. 반면 도심 접근성과 직주균형은 오히려 통행거리를 증가시키는 것으로 도출되었다.

3. 소 결

앞서 검토한 바와 같이 도시형태 특성이 통행에 미치는 영향에 대한 다수의 메타분석은 주로 북미 도시를 대상으로 이루어졌다. 북미 도시의 경우, 분석 결과 전통적으로 압축도시에서 강조되어 왔던 밀도 외에 연결성(Seto et al., 2014)과 접근성(Ewing and Cervero, 2010) 등이 상대적으로 통행에 미치는 영향 크기가 큰 것으로 도출되었다. 한편, 우리나라에서는 공간구조가 통행에 미치는 실증연구가 2010년 전후 비교적 활발하게 이루어졌으나, 연구에 따라 공간구조가 통행에 미치는 영향 방향 및 크기 결과가 상이하게 도출되었으며 이를 통합적으로 분석한 연구는 매우 부족하다. 김승남(2013)의 연구에서 관련 우리나라의 선행연구들을 체계적으로 검토하여 분석하였으나, 영향 크기에 대한 비교는 이루어지지 않았으며 1990년부터 2010년까지 기간의 연구들을 대상으로 연구가 이루어져 인프라, 기술, 경제가 빠르게 변화하고 있는 현재 상황을 반영하기에 한계가 있다. 국가별 인프라, 문화, 경제, 기술 수준 등은 상이하며 이로 인해 공간구조 특성이 통행에 미치는 영향은 다르게 나타난다. 따라서 우리나라를 대상으로 기존의 연구를 체계적, 통합적으로 검토하여 우리나라에서 공간구조가 통행에 미치는 영향에 대한 규명과 함께 기존 연구의 한계 및 문제를 기반으로 향후 연구 방향에 대한 제시가 시급하다.

III. 분석의 틀

1. 분석자료

본 연구는 도시형태 특성이 통행에 미치는 영향을 정량적으로 측정하기 위해 2000년부터 2021년 5월까지 우리나라에서 발표된 논문들을 대상으로 메타분석을 실시하였다. 분석을 위해 Research Information Sharing Services(RISS) 학술연구정보 서비스 사이트(www.riss.kr)를 이용하여 “도시” “형태” “통행” “밀도” “교통에너지”를 키워드로 조합하여 2000년 이후에 진행된 학술논문을 수집하였다. 수집 결과 총 549개의 논문이 검색되었으며, 그중 중복되는 논문을 제외하고 437개의 논문을 제목과 초록을 중심으로 검토하였다. 1차 검토 결과 총 53개의 논문이 본 연구의 분석대상으로 식별되었다. 2차 검토에서는 해당 논문들의 본문을 검토하여 본 연구를 수행하기 위해 필요한 변수의 통계 값이 제시되어 있지 않거나 경로분석, 상관관계 분석, 군집분석 등

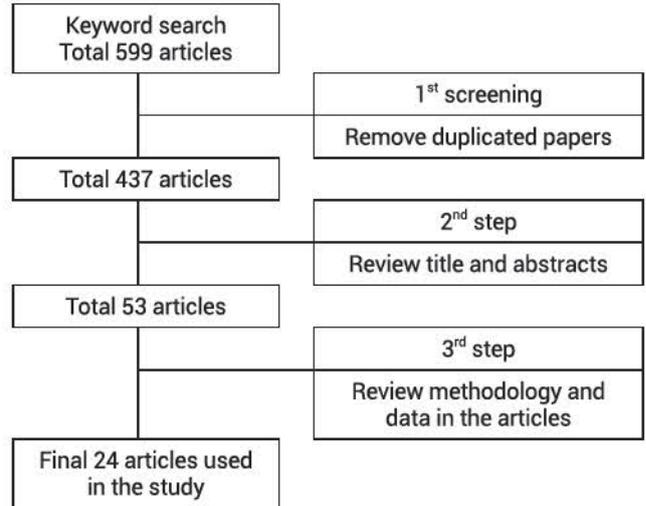


Figure 1. Screening process for meta analysis

본 연구 분석에 활용될 수 없는 방법론을 사용한 경우는 분석대상에서 제외하였다. 최종적으로 이와 같은 스크리닝 과정을 거쳐서 최종적으로 24개의 논문이 분석에 활용되었다(〈그림 1〉 참조).

2. 분석방법

본 연구에서는 선행연구들의 결과를 통합적으로 수집하고 통계적인 절차를 거쳐 종합된 결과를 제시하는 메타분석방법론을 활용한다. 메타분석은 사회과학분야(서미옥, 2011), 의학분야(강현, 2015) 등 다양한 학문 분야에서 널리 활용되고 있으며, 도시계획 분야에서도 Ewing and Cervero(2010), Salon et al. (2012) 등 다수의 연구에서 주요한 연구 방법으로 활용되어왔다. 메타분석은 다양한 표본과 가정, 측정에 의한 연구결과를 비교하고 통합하기 위하여 효과를 측정하기 위한 공통지표가 필요하다. 본 연구에서는 Ewing and Cervero(2010)에서 사용된 탄력성을 공통지표로 공간 형태가 통행에 미치는 영향을 통합 비교하고자 한다. 탄력성은 한 변수의 변화가 다른 변수의 변화에 미치는 영향을 측정하는 것으로 단위가 없는(unitless) 특징이 있다. 탄력성은 선형회귀분석, 로짓 분석 등 분석 모형에 따라서, 또 데이터를 원데이터를 활용하는지 로그를 취한 값을 사용했는지에 따라 〈표 1〉과 같이 계산될 수 있다. 표에서 보는 것과 같이 Log-log 형태의 선형회귀 분석을 제외하고는 탄력성 계산을 위해서 독립 변수 또는 종속변수의 평균값이 필요하다. 따라서 앞서 설명된 바와 같이 선행연구 스크리닝 과정에서 변수의 기초통계 값이 제시되어 있지 않은 연구는 본 분석에서 제외되었다. 한편, 로짓 모형을 활용하여 종속변수가 교통수단 선택과 관련된 연구들의 경우, 승용차 선택을 기준 범주(baseline category)로 통일하여 대중교통 혹은 비동력 수단 선택 확률이 변환하여 도시형태 특성의 영향을 계산하였다.

Table 1. Elasticity estimation formulas

Regression specification	Elasticity
Linear	$\beta \times \frac{\bar{x}}{y}$
Log-log	β
Log-linear	$\beta \times \bar{x}$
Linear-log	$\frac{\beta}{y}$
Logistic	$\beta \times \bar{x} \left(1 - \frac{\bar{y}}{n} \right)$
Tobit	$\beta \times \left(\frac{\bar{x}}{y} \right)$
Negative binomial	$\beta \times \bar{x}$

β is the regression coefficient, \bar{y} is the mean value of the travel variable of interest, and \bar{x} is the mean value of the urban form variable of interest. (Source: Ewing and Cervero, 2010)

IV. 분석 결과

1. 분석대상 선행연구 특성

본 연구에서 최종적으로 분석에 활용된 논문들은 <표 2>와 같다. 분석대상 연구 중 75%의 연구가 2010~2015년 사이에 이루어졌으며, 약 65%의 연구가 서울 및 수도권, 또는 광역시를 대상으로 이루어져 비수도권에 관한 실증연구가 상대적으로 부족함을 알 수 있다. 통행 관련 데이터의 경우 집계 데이터(aggregate data)와 개인 데이터 기반 세분화된 데이터(disaggregated data)를 사용한 연구 비중은 비슷하게 나타났다. 집계 데이터의 경우에는 데이터의 특성상 선형 회귀분석이 가장 많이 사용되었으며, 세분화된 개인 데이터를 사용한 경우에는 로짓, 위계선형, 토빗, 음이항 분석 등 다양한 분석방법이 활용되었다. 세분화된 데이터의 경우 가구통행실태조사(고은정·이경환, 2013; 김희철·안건혁, 2011; 김문현 외, 2019; 김희철 외, 2014; 성현곤 외, 2014b), 주행거리 실태조사(서승연 외, 2014), 인구주택총조사(이경환, 2013; 이진원 외, 2014; 성현곤·손동욱, 2020), 국민건강영양조사(성현곤 외, 2014a), 연구자 설문조사(성현곤 외, 2013)가 활용되었다.

본 연구는 도시형태특성이 통행량에 미치는 영향에 대한 메타 분석으로, 논문에 따라 다양한 지표가 도시형태 특성(독립변수)과 통행(종속변수)을 측정하기 위해 사용되었다. 해외 연구에서 자주 활용되는 승용차 주행거리 변수(Vehicle Miles Traveled, VMT)가 탄소 저감 측면에서 영향을 직접적으로 나타내는 변수 이겠지만, 통행량, 통행 분담률 등의 지표가 통행 거리의 대리변수로 활용되기도 한다(Salon et al., 2012). 통행과 관련한 변수

Table 2. Studies included in this study

Authors	Year	Study area	Data	Method
Jo	2009	Metropolitan	A	LNR
Sung and Choo	2010	SMG	A	LNR
Sohn and Kim	2010	Seoul	A	LNR
Kim and Seo	2011	79 Cities	A	LNR
Kim and Ahn	2011	Seoul	D	HLM
Seo and Kim	2011	32 Cities	A	LNR
Ko and Lee	2013	Seoul	D	LGR
Kwak et al.	2013	Seoul	A	LNR
Kim et al.	2013	Korea	A	LNR
Sung et al.	2013	SMG	D	LNR
Lee	2013	Seoul	D	HLM
Seo et al.	2014	74 Cities	D	MLA
Lee et al.	2014	75 Cities	D	HLM
Yi et al.	2014	Korea	A	LNR
Sung et al.	2014a	Korea	D	LGR
Kim et al.	2014	Seoul	D	TOR
Hyun and Kim	2014	Daegu	D	SLM
Sung et al.	2014b	Seoul	D	HLM
Kim and Song	2015	Korea	A	SLM
Min et al.	2016	Seoul	A	LNR
Sung	2017	Seoul	A	ARL
Kim et al.	2019	Seoul	D	NBR
Kwon and Kim	2020	SMG	A	SLM
Sung and Sohn	2020	SMG	D	TOR

Data: A, aggregate; D, disaggregate

Method: HLM, hierarchical linear modeling; LGR, logistic regression; LNR, linear regression; NBR, negative binomial regression; PRR, probit regression; SLM, spatial linear modelling; TOR, tobit regression; ARL, autoregressive distributed lagged model

는 승용차 사용과 관련한 1인당 교통에너지 소비량, 승용차 분담률 및 통행량, 주행거리 등의 변수가 사용되었으며, 통행패턴과 관련된 통근거리 및 통근시간 등의 변수도 사용되었다. 대중교통과 관련된 종속변수는 로짓모형을 활용하는 경우 승용차 대비 대중교통 선택 확률, 대중교통 통행량, 버스 및 철도 분담률 등의 변수가 활용되었다. 마지막으로 보행의 경우 보행시간, 보행확률, 비동력 통행 비율 등의 변수가 활용되었다. 한편 도시형태 특성을 측정하는 지표는 다수의 선행연구에서 활용되는 밀도, 토지이용혼합, 접근성, 연결성 부문에 초점을 맞추어 연구를 진행하였다. 도시형태 특성을 나타내는 지표 중 밀도가 가장 다수의 연구에서 사용되었으며, 밀도는 인구밀도, 고용밀도, 주택밀도, 상업밀도, 개발밀도 등의 지표로 측정되었다. 토지이용혼합도는 크게 직주혼합비와 엔트로피 지표를 활용한 토지이용 지표가 사용되었고, 접근성은 지하철, 버스정류장 등 대중교통 접근성, 고용접

근성 지표가 활용되었다. 마지막으로 연결성의 경우는 도로율, 도로밀도, 지표가 활용되었다.

2. 도시형태 특성이 통행량에 미치는 영향 크기

1) 밀도

밀도는 다른 지표에 비해 측정이 용이하여 도시공간 특성을 측정하는 지표로 가장 널리 활용되어왔다. 본 연구 분석대상 논문들에서도 가장 많이 활용되었는데, 밀도 측정을 위해 인구수, 고용자수, 주택수 등이 활용되었다. 본 연구에서는 밀도가 미치는 영향을 크게 승용차 통행과 대중교통 및 비동력 통행에 미치는 영향으로 구분하여 검토하였다(그림 2) 참조.

밀도가 승용차 통행에 미치는 영향은 탄력성이 -2.86부터 0.94 사이의 값으로 나타났으며, 밀도 특성 지표들의 평균 탄력성은 -0.19¹⁾로 도출되었다. 각 밀도별 승용차 통행에 미치는 영향은 다음과 같다. 우선, 인구밀도의 경우, 평균 탄력성은 -0.328으로 인구밀도가 1% 증가할 때 차량통행이 0.328% 감소하는 것으로 나타났다. 인구밀도의 경우 김문현 외(2019)를 제외하고는 모두 음의 탄력성, 즉 인구밀도가 증가하면 차량 통행은 줄어드는 것으로 나타나 비교적 일관된 결과를 보이고 있다. 김문현 외(2019) 연구에서는 이와 같은 결과에 대해 인구밀도의 양의 영향과 가구 밀도의 음의 영향 관계가 상호 통제하는 영향을 동일한 가구밀도에서 인구밀도가 증가할수록, 즉 가구크기가 클수록 승용차 통행량이 증가하는 것으로 해석하고 있다. 한편, 밀도의 영향을 보기 위해서는 일반적으로 많이 사용되는 인구수를 행정구역 면적으로 나눈 인구밀도 외에 인구수를 시가화 면적 기준으로 산출한 순인구밀도의 영향을 보는 것도 중요하다. 순인구밀도의 경우(조운애, 2009; 김경태·송재민, 2015) 평균 탄력성은 -1.48로, 순인구 밀도의 증가가 차량통행에 미치는 영향은 탄력성이 1보다 크게 나타나 탄력적, 즉 순인구밀도 증가 변화에 비해 통행이 감소되는 폭이 더욱 크게 나타났다. 고용밀도의 경우 승용차 통행에 미치는 영향은 평균 탄력성이 0.069로 도출되었다. 이는 민병학 외(2016) 연구에서 탄력성 절댓값이 다른 연구에 비해 크게 나타난 결과로 이를 제외한 모든 연구에서 고용밀도로 인한 탄력성은 모두 음의 값으로 도출되었다. 하지만 음의 탄력성 연구결과들의 경우 탄력성의 크기가 크지 않아, 고용밀도가 승용차 통행에 미치는 영향은 인구밀도나 주거밀도에 비하여 크지 않은 것으로 해석될 수 있다. 마지막으로, 주거밀도의 경우 평균 탄력성은 -0.173으로 도출되었으나, 5개의 결과 중 양의 영향과 음의 영향이 각각 2개, 3개로 도출되어 영향 방향이 명확하지 않은 것으로 도출되었다.

한편 밀도 관련한 지표들이 대중교통 이용 및 비동력 이동에 미친 영향은 다수의 연구에서 양의 영향이 관측되었다. 탄력성의 범위는 -2.00부터 1.11 사이의 값으로 나타났으며, 평균 탄력성

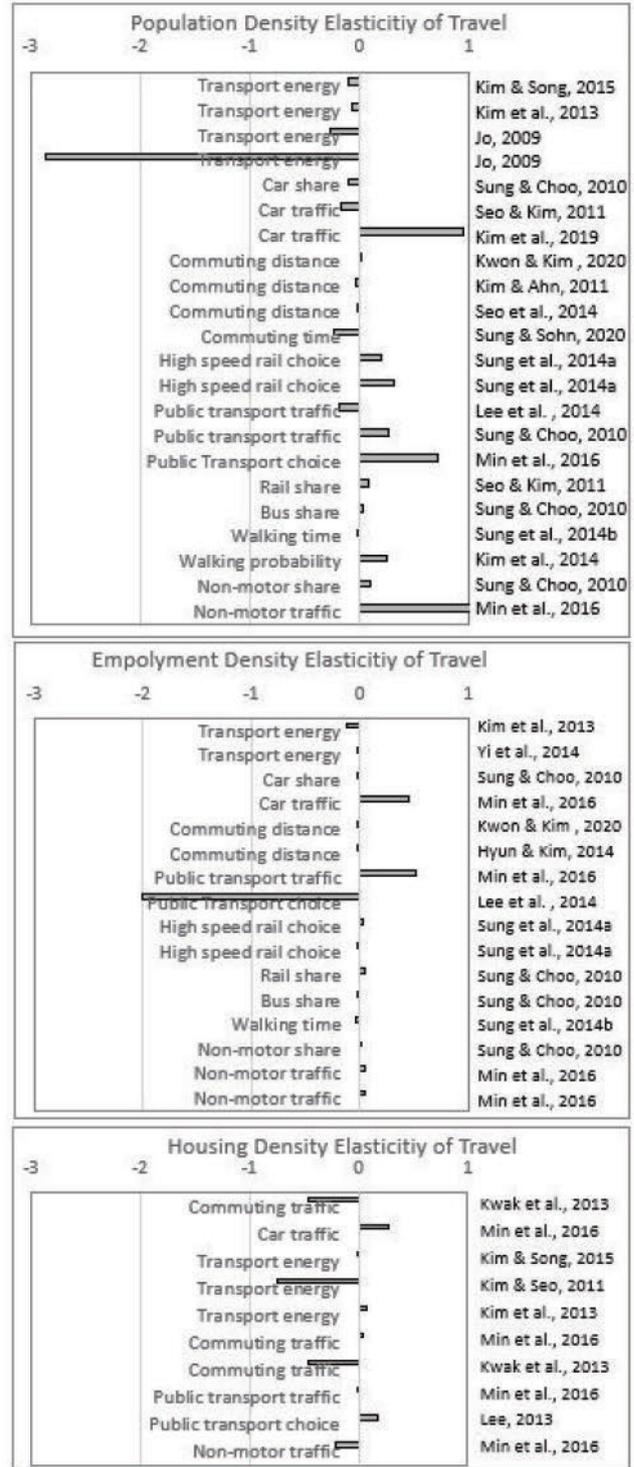


Figure 2. Density elasticity of travel

은 0.030으로 나타났다. 각 세부 밀도별 영향은 다음과 같다. 우선, 인구밀도의 경우 고속철도 선택, 대중교통 분담비율, 비동력 통행량 등에서 11개 연구결과 중 2개의 탄력성을 제외하고 모두 양의 탄력성을 가지는 것으로 나타났다. 한편, 고용밀도의 경우에도 이진원 외(2014)와 민병학 외(2016)를 제외하고는 탄력성이 매우 낮은 것으로 나타나 승용차와 대중교통 및 기타 통행에 미치는 영향이 인구밀도에 비해서 영향 크기가 상대적으로 작음을 알

수 있다. 마지막으로, 주거밀도의 경우 연구결과 간 영향 방향이 상이하여 앞서 승용차 통행에 미치는 영향과 유사하게 그 영향 방향이 명확하지 않은 것으로 도출되었다.

2) 다양성

토지이용의 다양성은 다양한 지표로 측정가능하다. 본 연구에서 분석대상 논문들에서는 직주균형비율과 토지이용 혼합 정도를 측정한 엔트로피 지수가 가장 널리 활용되었다. 토지이용 다양성이 승용차 통행에 미치는 영향은 <그림 3>에서 보이는 바와 같이 탄력성이 -0.383~0.09 범위로 나타났으며, 평균 탄력성은 -0.186으로 나타났다. 직주균형비율 및 엔트로피 지수의 영향은 다음과 같다. 우선, 직주균형의 경우 승용차 통행에 미치는 영향은 대체적으로 음의 영향(평균 탄력성 -0.077)을 가지는 것으로 나타나, 직주균형이 개선될수록 승용차 통행은 줄어드는 것으로 나타났다. 김보현 외(2013)의 연구에서 유일하게 직주균형이 교통에너지 소비에 양의 영향을 미치는 것으로 도출되었는데, 교차통행의 가능성과 장거리 통행자 증가로 설명하고 있다. 다음으로, 엔트로피 지수로 측정된 토지이용 혼합이 승용차 통행에 미치는 영향은 모든 탄력성이 음의 값이며, 승용차 통행량의 탄력성 절댓값(평균 탄력성 -0.186)이 직주균형에 대한 탄력성보다 크게 나타나 토지혼합의 역할이 상대적으로 더욱 중요하게 도출되었다. 다만, 본 연구에서는 토지혼합도를 엔트로피 지수로 측정된 연구만 포함시켜 토지혼합의 영향에 대한 실증연구수는 비교적 적은 편이다.

한편, 직주균형비율과 엔트로피 지수로 측정된 토지혼합도가

대중교통 이용 및 비동력 통행에 미치는 영향은 -0.374 ~0.540 범위값을 가지고, 탄력성 평균은 -0.004로 음의 영향을 가지나 0에 가까운 값으로 도출되었다. 직주균형과 토지혼합이 대중교통 통행에 미치는 영향은 연구결과에 따라 영향 방향이 상이하게 나타났다. 직주균형이 대중교통 선택에는 긍정적 영향을 미치는 것으로 나타났으나, 도보나 자전거 사용 등의 비동력 통행에는 부정적 영향을 미치는 것으로 나타났다. 직주균형이 비동력 통행에 미치는 연구는 2개의 연구결과이므로 이는 향후 추가적으로 검토가 필요할 것으로 보인다. 한편, 토지혼합이 대중교통 선택 및 비동력 통행에 미치는 영향 또한 연구결과에 따라 상이하게 도출되어 영향관계가 분명하지 않음을 확인하였다.

3) 접근성

접근성은 다양한 지표로 측정가능하다. 본 연구의 분석 논문들에서는 접근성을 측정하는 지표로 버스 또는 전철/기차 등의 대중교통까지의 거리, 고용 또는 도심까지의 거리, 또는 대중교통의 밀도가 접근성 변수가 활용되었다. 거리로 측정된 접근성 변수와 밀도로 측정된 접근성 변수는 탄력성 부호의 해석에 유의할 필요가 있다. 왜냐하면, 거리로 측정된 접근성 변수의 탄력성은 거리가 1% 증가할 때 즉 접근성이 저하됨을 의미하는 반면, 밀도로 측정된 접근성 변수의 탄력성은 밀도가 1% 증가할 때 즉 접근성이 개선되는 경우의 영향 크기를 측정하기 때문이다. 본 연구에서는 두 가지 변수의 상이한 영향 방향을 일관되게 하기 위해 거리로 측정된 접근성 변수의 탄력성의 경우 부호를 반대로 하여 해석하였다.

<그림 4>에서 보는 바와 같이 접근성이 승용차 통행에 미치는 영향은 탄력성이 -0.031~-0.012 범위로 나타났으며, 평균 탄력

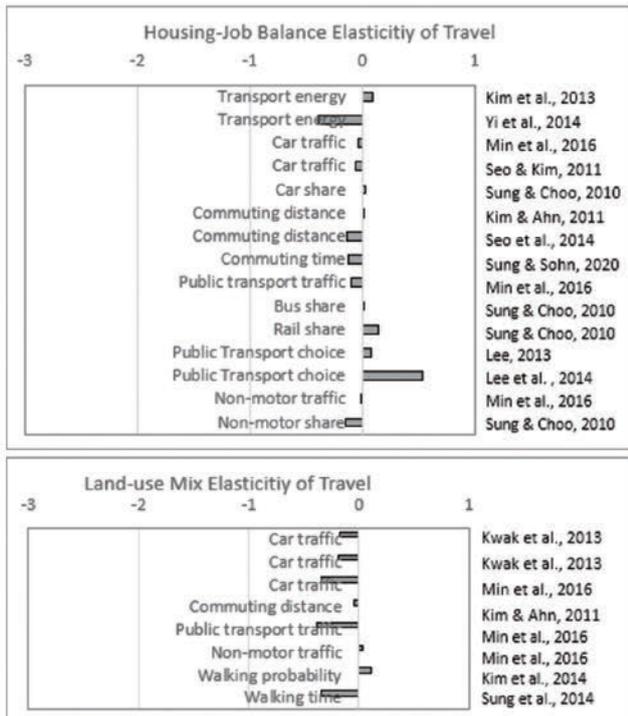


Figure 3. Diversity elasticity of travel

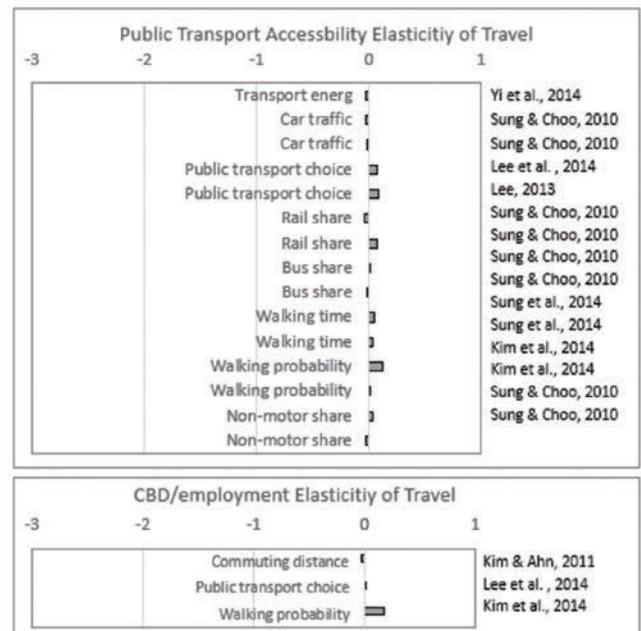


Figure 4. Accessibility elasticity of travel

성은 -0.023로 나타났다. 이는 다른 도시형태 특성 변수들의 탄력성과 비교했을 때, 가장 낮은 절댓값을 가지는 결과로 대중교통 및 고용 접근성이 승용차 통행을 줄이는 데 기여하나, 실제 그 영향 크기는 미미함을 의미하고 있다. 한편 접근성이 대중교통 및 비동력 통행에 미치는 영향을 측정된 탄력성은 -0.045~0.182의 범위로 나타났으며, 평균 탄력성은 0.043으로 도출되었다. 대중교통 접근성으로 인한 대중교통 선택 확률은 모두 양의 영향으로 나타났으며, 대중교통 접근성 개선으로 인한 철도 또는 버스 분담률은 각각 철도와 버스로의 접근성이 개선될 때 증가함을 확인하였다. 또한, 대중교통으로의 접근성은 대체적으로 보행 및 비동력 교통수단 분담률에도 긍정적인 영향을 주는 것으로 나타났다. 한편 고용 접근성 개선 또한 대중교통 선택 및 보행 확률을 높이는 것으로 나타났다.

4) 연결성

도시의 연결성은 도로 및 교차로밀도로 측정되었다. 연결성이 승용차 통행에 미치는 영향은 탄력성이 -0.075~0.394 범위로 나타났으며, 평균값은 0.058로 나타났다. 도로밀도의 경우 교통에너지, 승용차 통행량 및 승용차 분담률 모두에 양의 영향을 미치는 것으로 나타났는데, 교차로밀도의 경우 일관되지 않은 결과가 도출되었다(〈그림 5〉 참조).

도시의 연결성이 대중교통 이용 및 비동력 통행에 미치는 영향은 탄력성이 -0.034~0.357 범위로 나타났으며, 평균값은 0.010으로 양의 영향을 가지나 그 크기는 매우 작은 것으로 나타났다. 이는 도로밀도와 교차로밀도가 대중교통 및 비동력 통행에 미치

는 평균적 영향 방향이 상반되게 나타난 결과로, 도로밀도의 평균 탄력성은 -0.074, 교차로밀도의 평균 탄력성은 0.083으로 도출되었다.

5) 종합

본 연구의 결과를 Ewing and Cervero(2010)과 비교해보면 〈표 3〉과 같다. 우리나라 도시들을 대상으로 한 실증연구결과들에서 도시형태 특성 변수가 통행에 미치는 영향을 분석한 결과, 영향의 방향, 즉 긍정적 혹은 부정적 영향에 대한 결과도 다양하게 도출되었다. 예를 들어, 혼합토지이용이 대중교통 및 비동력 통행에 미치는 영향은 2개의 논문에서는 양의 영향, 나머지 2개의 논문에서는 부의 영향으로 도출되었다. 본 연구에서는 Ewing and Cervero(2010) 연구결과와의 비교를 위해, 분석대상이 된 연구 결과 중 70% 이상 동일한 영향 방향으로 도출된 연구결과(〈표 3〉에서 굵은 글씨로 표시되어 있는 결과)를 중심으로 영향 관계 및 크기를 해석하고자 한다.

우선 탄력성을 기준으로 가장 통행에 영향을 크게 미치는 도시형태요소가 미국의 경우에는 도로 및 교차로로 측정되는 연결성이었으나, 우리나라의 경우에는 밀도, 특히 인구밀도가 승용차 사용 저감과 대중교통 및 비동력 통행 모두에 미치는 영향이 가장 크게 나타났다. 이와 같은 연구결과는 미국 대도시의 경우 우리나라의 도시들에 비하여 인구밀도가 상대적으로 매우 낮아 밀도의 1% 변화가 통행에 미치는 영향이 크지 않게 도출된 것으로 해석할 수 있다. OECD(2021)에서 집계한 대도시권 데이터에 의하면 2018년 기준 미국 대도시권의 평균 인구밀도는 165인/km²인 반면 우리나라의 평균 인구밀도는 1195인/km²으로 우리나라의 도시 인구밀도가 7배 높다.²⁾ 현재 도출된 탄력성은 x, y 변수의 평균값, 즉 \bar{x} 와 \bar{y} 에서의 탄력성으로 평균밀도에서 1%의 변화를 의미하는데, 미국의 경우 평균밀도 자체가 매우 낮아 밀도의 변화가 통행 거리 저감이나 대중교통 사용에 미치는 영향이 크지 않은 것으로 나타나는 것이다. 이는 인구밀도가 어느 정도 이상의 임계치를 넘어야 밀도 정책이 통행거리 감소나 대중교통 건설 및 이용에 효과적임을 의미하고 있다. 고용밀도의 경우 평균 탄력성이 양의 영향을 가지는 것으로 나타났으나, 이는 앞서 논의한 바와 같이 다른 3개의 연구결과에서는 음의 영향인 반면 민병학 외(2016)의 연구에서 절댓값이 큰 양의 탄력성이 도출되었기 때문이다. 미국의 경우에도 고용밀도의 탄력성이 0.000으로 도출되어 차량 통행에 영향을 크게 미치지 않는 것으로 도출된 점을 고려할 때, 인구밀도나 주거밀도가 통행에 미치는 영향이 중요함을 시사하고 있다. 한편, 우리나라에서는 밀도 다음으로 토지이용 혼합도가 중요하게 나타나 토지이용 혼합이 승용차 사용을 줄이는 데 효과적임을 보이고 있다.

한편, Ewing and Cervero(2010)에서는 도로 및 교차로밀도(street/intersection density)를 하나의 변수로 하여 통행에 미

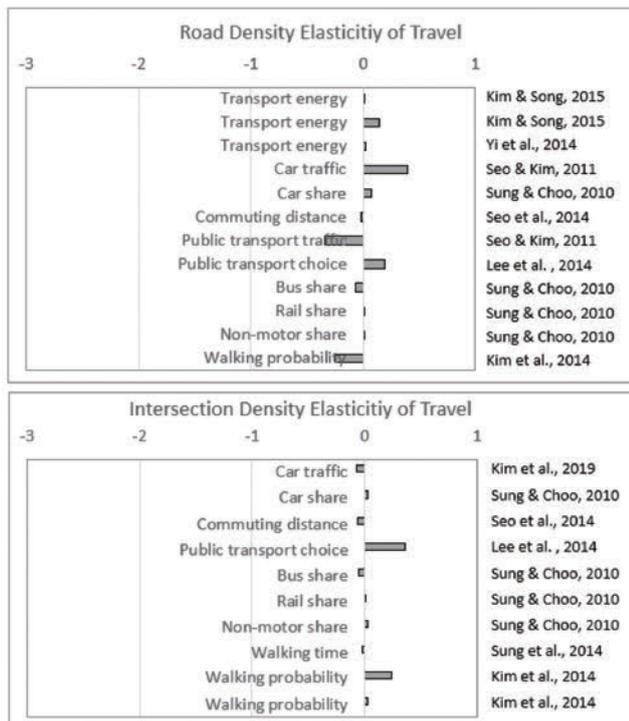


Figure 5. Connectivity elasticity of travel

Table 3. Elasticity estimation formulas

Urban form	Travel	Average elasticity			
		This study size (+, -)*	Ewing and Cervero (2010)		
Density	Population	Car	-0.328	(1, 7)	-0.04
		Public transport/non-motorized	0.261	(9, 2)	0.070
	Employment	Car	0.069	(1, 3)	0.000
		Public transport/non-motorized	-0.137	(6, 4)	0.025
Housing	Car	-0.173	(2, 3)	-0.040	
	Public transport/non-motorized	-0.017	(1, 2)	0.070	
Diversity	Housing-job balance	Car	-0.077	(3, 5)	-0.020
		Public transport/non-motorized	0.074	(4, 3)	0.190
	Land-use mix	Car	-0.186	(0, 4)	-0.090
		Public transport/non-motorized	-0.139	(2, 2)	0.130
Accessibility	Public transport	Car	-0.023	(0, 3)	-0.050
		Public transport/non-motorized	0.035	(9, 3)	0.150
Connectivity	Road density	Car	0.105	(5, 1)	-0.120
		Public transport/non-motorized	-0.074	(3, 3)	0.230
	Intersection density	Car	-0.036	(1, 5)	-0.120
		Public transport/non-motorized	0.083	(5, 2)	0.230

*(+, -) refers to the total number of research with positive and negative elasticity, respectively. Elasticity indicated in bold means that 70% or more of the study results showed the same direction of influence

치는 영향을 측정하였는데, 미국 도시의 경우 도시형태 중 도로 및 교차로밀도 등 연결성 특성이 승용차 사용을 줄이고 대중교통 사용을 늘리는 데 가장 큰 영향이 있는 것으로 나타났다. 우리나라의 경우에는 도로밀도와 교차로밀도의 영향이 각각 다르게 도출되었는데 도로밀도가 증가할수록 승용차 사용이 늘어나고, 교차로밀도가 증가할수록 승용차 사용은 줄고 대중교통 및 비동력 통행은 늘어나는 것으로 도출되었다. 이는 일반적으로 차량 사용과 관련된 교통 인프라가 많이 제공될수록 차량 사용이 늘어난다는 가설과 일치하는 결과라 할 수 있다. 우리나라의 경우 교차로 밀도가 보행 및 비동력 통행에 미치는 영향이 인구밀도 다음으로 중요하게 나타나 보행친화도시 조성에 평균 블록 크기가 작고 가로의 연결성이 좋은 도시 환경이 중요한 것으로 도출되었다. 가로 연결성이 좋을수록 보행자를 위한 다양한 경로와 접근성이 향상될 수 있다(주용진 외, 2012).

V. 결론

본 연구는 우리나라를 대상으로 도시형태 특성이 통행에 미치는 영향을 종합적으로 검토하고자, 정량 분석 기반의 선행연구결과를 통합적으로 분석하는 메타분석을 실시하여 영향의 크기 및 방향을 규명하였다. 본 연구의 주요한 결과 및 향후 연구에 대한

시사점은 다음과 같다.

첫째, 선행연구 분석 결과, 동일한 대상지와 데이터 유형 및 분석방법을 사용한 경우에도 도시형태 특성이 통행에 미치는 영향 크기는 다양하게 도출된 것을 확인할 수 있었다. 또한, 영향의 크기뿐만 아니라 관계의 방향이 상이하게 도출된 연구결과도 다수 존재한다. 예를 들어 직주혼합도가 교통에너지 소비량에 미치는 영향이 김보현 외(2013)에서는 양의 영향, 이창효 외(2014)에서는 음의 영향으로 나타났다. 이는 분석 시점의 차이, 모형의 독립 변수 선택에 따른 차이, 활용 데이터의 차이 등으로 이해될 수 있다. 하지만, 이와 같은 영향 측정 결과의 편차(variability)에도 불구하고, 밀도, 혼합도, 대중교통 접근성, 교차로밀도 등의 변수의 경우에는 다수의 연구에서 일반적인 경향성을 확인할 수 있었다. 또한, 각 도시형태 특성 변수가 공간에 미치는 영향 방향은 도로 밀도를 제외하고는 미국 도시를 대상으로 메타분석을 진행한 Ewing and Cervero(2010)와 유사한 경향을 보여주고 있다.

둘째, 우리나라의 경우 도시형태 특성 중 인구밀도가 승용차 사용 및 대중교통, 비동력 통행에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 특히, 인구밀도의 평균 탄력성이 승용차 통행과 관련해서는 -0.328, 대중교통 및 비동력 통행과 관련해서는 0.261로 도출되어 다른 요인에 비하여 탄력성 값이 가장 크게 도출되었다. 이와 같은 결과는 우리나라의 미래 인구 변화 추이를 고려했

을 때 매우 우려스러운 부분이다. 통계청(2019)의 인구 추계에 따르면, 2050년까지 우리나라는 2020년 인구 대비 수도권과 비수도권은 각각 인구가 -5%, -11%가량 감소할 것으로 예측되고 있기 때문이다. 이와 같은 미래 인구변화를 고려할 때 향후 에너지 효율적 도시공간을 조성하기 위해서는 순 인구밀도를 유지하거나, 또는 인구밀도가 줄어든 상황에서도 대중교통 및 비동력 통행이 가능한 환경을 조성하는 것이 중요하다. 특히, 비수도권의 경우 인구 감소의 규모가 크고 속도가 빠르게 진행되고 있기 때문에 순 인구밀도를 일정 수준 유지할 수 있도록 도시권 차원에서 거점을 중심으로 콤팩트 성장을 유도하는 공간 정책이 매우 중요하다고 하겠다. 또한 인구밀도가 낮은 지역에서 수요응답형 대중교통, 소형 자율주행셔틀 등 ICT 및 스마트 기술을 활용하여 대중교통 및 비동력 통행을 활성화하기 위한 방안 도입도 중요하다.

셋째, 향후 연구에서는 다양한 차원의 공간 위계에 대해 공간 형태 특성이 통행에 미치는 영향에 대한 분석이 필요하다. 교통수단의 발달로 인한 모빌리티의 광역화를 고려했을 때, 광역 및 지역권 차원의 공간구조 특성이 중요하다. 하지만, 우리나라 대부분의 선행연구들은 전국 및 수도권을 대상으로 시군구 단위 또는 서울시의 경우 행정동 단위에서 분석한 연구가 대부분이며 도시권역 차원에서의 공간형태 특성이 통행에 미치는 영향에 대한 분석은 거의 이루어지고 있지 않았다. 또한, 우리나라의 경우 공간형태와 교통 부문 에너지 및 이산화탄소의 관계에 관한 연구가 2010년 정도에 활발했던 것과는 대조적으로, 해외의 경우 최근 5년간의 연구가 지난 15년간 진행된 연구의 2/3를 차지(Zhang et al., 2021)하고 있어 최근 매우 활발하게 관련 분야 연구가 진행되고 있는 것을 알 수 있었다. 우리나라에서도 공간 전략 수립을 위해 다양해진 데이터를 활용하고 지역권, 도시 및 생활권 차원 등 다양한 공간 위계에서 기존 연구를 고도화시킨 연구가 필요하다.

마지막으로, 에너지 저감에 효과적인 도시공간 전략을 구사하기 위해서는 각각의 도시형태 특성의 변화가 실제 공간에서 어떠한 의미를 가지며, 더 나아가 어떠한 정책적 옵션이 가장 비용효과적, 환경적, 사회적으로 바람직한지에 관한 면밀한 분석이 필요하다. 밀도를 높이거나 토지이용 다양성을 높이는 것이 온실가스 저감 측면에서는 통행을 줄여 동일한 영향을 줄 수 있으나, 두 가지 정책 옵션에 따른 사회적, 환경적인 영향은 매우 다를 수 있기 때문이다. 예를 들어, 밀도를 증가시키는 것은 교통에너지 사용과 그로 인한 온실가스 저감에는 긍정적인 영향을 미칠 수 있으나, 지역의 활성화, 혼잡으로 인한 환경문제 등에도 영향을 미칠 수 있기 때문이다.

본 연구는 탄소저감형 공간형태를 규명하기 위하여 기존의 선행연구결과를 종합적으로 검토하여 도시형태 특성이 통행에 미치는 영향을 분석하였다. 이와 같은 연구결과는 우리나라에서 향후 탄소저감형 공간 전략 수립을 위한 기초자료로서 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 하지만 본 연구는 데이터 및 분석방법으로

인해 다음과 같은 한계를 가지고 있다. 우선 도시형태 특성 변수에 따라 메타분석이 가능한 연구수에 큰 차이가 있어서, 일부 변수의 경우 신뢰성 있는 결과를 확보하기에 분석대상 연구수가 충분하지 않았다. 또한 탄력성의 산술 평균값의 경우 특정 탄력성 절댓값이 큰 결괏값에 의해 영향을 받기 때문에, 평균값을 기준으로 해석할 때 주의해야 할 필요가 있다. 탄력성 평균값뿐만 아니라 최소, 최댓값, 전반적 경향성 등을 종합적으로 고려하여 도시형태특성이 통행에 미치는 영향에 대한 해석이 필요하다.

- 주1. Ewing and Cervero(2010) 연구에서는 탄력성의 평균값을 데이터 샘플수를 가중치로 하여 계산하였으나 본 연구에서는 각 연구에서 도출된 탄력성의 산술평균을 평균값으로 활용하였다. 이는 본 연구 대상 논문들의 경우 집계 데이터와 비집계 데이터를 사용한 경우, 비집계 데이터의 샘플수가 집계 데이터에 비하여 월등히 많아 이를 가중치로 사용하는 것이 적절하지 않아 산술평균 방법을 사용하였다.
- 주2. 미국과 우리나라의 대도시권 평균 인구밀도 수준 비교를 위하여 OECD 대도시권 통계에 기반하여 평균밀도를 도출하였다. OECD 대도시권 통계에는 미국과 우리나라의 대도시권은 각각 170개, 20개의 대도시 데이터를 제공하고 있다.

인용문헌 References

1. 강현, 2015. “메타분석에서 통계학적 고려사항들”, *Hanyang Medical Reviews*, 35: 23-32.
- Kang, H., 2015. “Statistical Considerations in Meta-analysis”, *Hanyang Med Rev*, 35: 23-32.
2. 고은정·이경환, 2013. “압축도시 계획요소가 지역주민들의 쇼핑 통행에 미치는 영향: 서울시를 대상으로”, 『한국산학기술학회 논문지』, 14(8): 4077-4085.
- Ko, E.J. and Lee, K.H., 2013. “Effects of Compact City Development on Residents’ Shopping Trips: A Case study of Seoul”, *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 14(8): 4077-4085.
3. 곽은미·엄선용·이명훈, 2013. “토지이용패턴 특성이 통행발생량에 미치는 영향에 관한 연구: 서울시를 중심으로”, 『국토계획』, 48(5): 7-21.
- Kwak, E.M., Eom, S.Y., and Lee, M.H., 2013. “The Study on the Effect of Land Use Pattern on Traffic Volume: Focused on Seoul”, *Journal of Korea Planning Association*, 48(5): 7-21.
4. 권성문·김성연, 2020. “도시밀도가 통근시간 및 거리에 미친 영향”, 『교통연구』, 1-17.
- Kwon, S.M. and Kim, S.Y., 2020. “The Effects of Urban Density on Commuting Time and Distance”, *Journal of Transport Research*, 1-17.
5. 김경태·송재민, 2015. “도시 공간 특성이 교통에너지 소비에 미치는 영향”, 『한국지역개발학회지』, 27(2): 117-137.
- Kim, K.T. and Song, J.M., 2015. “The Impact of Urban Spatial

- Form on Energy Consumption in the Transportation Sector”, *Journal of The Korean Regional Development Association*, 27(2): 117-137.
6. 김리영·서원석, 2011. “압축도시 특성이 지역별 교통에너지 소비에 미치는 영향 분석: 수도권 비수도권 간의 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.
 7. 김문현·김태형·박시현·Tsolmon Bayarsaikhan·이석영·박재희, 2019. “가산자료 모형을 활용한 서울시 주말 승용차 통행 특성 분석”, *서울도시연구*, 20(4): 135-147.
Kim, M.H., Tommy Gim, T.H., Park, S.H., Bayarsaikhan, T., Lee, S.Y., and Park, J.H. 2019. “An Analysis of Automobile Travel Behavior on Weekends in Seoul through Count Data Modeling”, *Seoul Studies*, 20(4): 135-147.
 8. 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.I., 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.
 9. 김승남, 2013. “도시형태와 통행관련 영향(1990-2010)”, *건축도시정책동향*, 10: 37-58.
Kim, S.N., 2013. “Urban Form and Travel-related Impact (1990-2010)”, *AURI Policy Updates*, 10: 37-58.
 10. 김희철·안건혁, 2011. “압축도시 계획요소가 소득계층별 통근거리에 미치는 영향”, *한국도시설계학회지*, 12(1): 55-70.
Kim, H.C. and Ahn, K.H., 2011. “The Effects of Compact City Planning Strategies on Commuting Distance of Different Income Levels: Focused on Seoul, Korea”, *Journal of the Urban Design Institute of Korea Urban Design*, 12(1): 55-70.
 11. 김희철·안건혁·권영상, 2014. “개인의 보행확률에 영향을 미치는 거주지 환경요인”, *한국도시설계학회지*, 15(3): 5-18.
Kim, H.C., Ahn, K.H., and Kwon, Y.S., 2014. “The Effects of Residential Environmental Factors on Personal Walking Probability - Focused on Seoul”, *Journal of the Urban Design Institute of Korea Urban Design*, 15(3): 5-18.
 12. 민병하·이건원·김세용, 2016. “토지이용특성이 통행수단 및 통행목적별 통행패턴에 미치는 효과: 서울시 행정동을 대상으로”, *대한건축학회 논문집-계획계*, 32(4): 77-87.
Min, B.H., Lee, G.W., and Kim, S.Y., 2016. “The Effects of Land-use Characteristics on Trip Patterns by Trip Modes and Purposes: Focused on Seoul Metropolitan Administrative Division”, *Journal of the Architectural Institute of Korea, Planning & Design*, 32(4): 77-87.
 13. 서미옥, 2011. “메타분석 연구의 고찰과 연구방법론적인 제안”, *교육학연구*, 49(2): 1-23.
Suh, M.O., 2011. “The Review of Meta-analysis and Research Methodology Proposed”, *Korean Journal of Educational Research*, 49(2): 1-23.
 14. 서민호·김세용, 2011. “도시형태 계획요소와 통행행태 특성요소 간 연관성 분석: 도시 규모·입지에 따른 녹색도시 계획 정책을 중심으로”, *국토계획*, 46(4): 223-244.
Seo, M.H. and Kim, S.Y., 2011. “An Analysis on the Relationship between Planning Elements of Urban Form and Travel Behavior Characteristics: Focused on Planning Policy for the Green City by Size and Locations”, *Journal of Korea Planning Association*, 46(4): 223-244.
 15. 서승연·김승남·이정환, 2014. “차량 주행거리에 영향을 미치는 도시 토지이용 및 도시형태 특성에 관한 실증분석: 한국의 74개 중소도시를 대상으로”, *국토계획*, 49(8): 107-121.
Seo, S.Y., Kim, S.N., and Lee, K.H., 2014. “Effects of Land Use and Urban Form on Vehicle Kilometer Traveled: Focused on the 74 Small and Medium-sized Cities in Korea”, *Journal of Korea Planning Association*, 49(8): 107-121.
 16. 성현곤, 2017. “서울시 대중교통수단별 월별 이용수요의 변동에 영향을 미치는 요인 분석”, *국토계획*, 52(2): 81-97.
Sung, H.G., 2017. “Exploring Impact Factors on the Variation of Monthly Transit Ridership by its Mode in Seoul”, *Journal of Korea Planning Association*, 52(2): 81-97.
 17. 성현곤·고두환·최창규·천상현, 2014b. “주거지 근린환경과 개인의 보행활동의 연관성 재검증: 서울시 149개 행정동을 대상으로”, *국토계획*, 49(1): 81-94.
Sung, H.G., Go, D.H., Choi, C.G., and Cheon, S.H., 2014. “Reexamining the Association of Residential Neighborhood Physical Environment with Personal Walking Activity: Focused on 149 Administrative Districts in the Seoul City”, *Journal of Korea Planning Association*, 49(1): 81-94.
 18. 성현곤·김영국·이주연, 2013. “수도권 광역철도 이용수요와 통행행태 연관성에 관한 연구”, *국토계획*, 48(1): 165-179.
Sung, H.G., Kim, Y.K., and Lee, J.Y., 2013. “A Study on the Relationship of Travel Behavior with Ridership for Regional Railways in the Korean Capital Region”, *Journal of Korea Planning Association*, 48(1): 165-179.
 19. 성현곤·최막중·이수기, 2014a. “장거리 통행의 교통수단 선택 결정요인: 승용차 대비 고속철도를 중심으로”, *국토계획*, 49(2): 245-257.
Sung, H.G., Choi, M.J., and Lee, S.G., 2014. “Determinants of Transportation Mode Choice for Long-distance Travel in Korea: Focused on High-speed Rail over Private Car”, *Journal of Korea Planning Association*, 49(2): 245-257.
 20. 성현곤·손동욱, 2020. “통근에서 승용차의 수단선택과 통행시간의 숨겨진 효과: 개인, 가구, 거주지역의 다수준 결정요인을 중심으로”, *국토계획*, 55(1): 54-68.
Sung, H.G. 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.
 21. 성현곤·추상호, 2010. “근린생활권 단위의 압축도시개발이 통행수단분담률과 자족성에 미치는 효과분석”, *국토계획*, 45(1): 155-169.
Sung, H.G. and Choo, S.H., 2010. “The Effects of Com-

- pact-City Development at the Living Area of Neighborhood Level on Modal Split and Self-Sufficiency”, *Journal of Korea Planning Association*, 45(1): 155-169.
22. 손동욱·김진, 2010. “서울시 역세권의 도시형태 특성과 대중교통 이용률 간의 연관성 분석”, 「한국도시설계학회지 도시설계」, 11(1): 33-44.
Sohn, D.W. and Kim, J., 2010. “Analysis of the Relationships between Land Use Characteristics of Urban Transit Centers and the Level of Transit Usage: Case Studies of Seoul Metropolitan Area”, *Journal of the Urban Design Institute of Korea Urban Design*, 11(1): 33-44.
 23. 이진원·정윤남·김세용, 2014. “통근통행을 위한 통행수단으로서 승용차 선택에 개인속성 및 도시특성, 도시형태가 미치는 영향”, 「한국산학기술학회 논문지」, 15(5): 3240-3250.
Lee, G.W., Jeong, Y.N., and Kim, S.Y., 2014. “Impact of Individual Traits, Urban Character and Urban Form on Selecting Cars as Transportation Mode for Work Travel”, *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 15(5): 3240-3250.
 24. 이경환, 2013. “근린의 토지이용과 대중교통시설 보행접근성이 통근통행에 미치는 영향: 서울시를 대상으로”, 「한국산학기술학회 논문지」, 14(9): 4593-4601.
Lee, K.H., 2013. “Impacts of Neighborhood’s Land Use and Transit Accessibility on Residents’ Commuting Trips: A Case study of Seoul”, *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 14(9): 4593-4601.
 25. 이창효·김보현·이승일, 2014. “인구와 고용규모 변화의 유형별 시군구 단위의 교통에너지 소비 영향요인 분석”, 「국토계획」, 49(1): 281-297.
Yi, C.H., Kim, B.H., and Lee, S.I., 2014. “Influence Factors on Transportation Energy Consumption of Municipality Variation Types by Population and Workers”, *Journal of Korea Planning Association*, 49(1): 281-297.
 26. 조윤애, 2009. “압축도시와 교통에너지소비의 관계에 대한 실증 연구: 7대 광역도시를 중심으로”, 「한국사회와 행정연구」, 19(4): 113-132.
Jo, Y.A., 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.
 27. 주용진·하은지·전철민, 2012. “TOD 계획 요소의 통합적 접근을 통한 친보행 환경의 평가 방안”, 「한국공간정보학회지」, 20(3): 15-25.
Joo, Y.J., Ha, E.J., and Jun, C.M., 2012. “An Empirical Evaluation Scheme for Pedestrian Environment by Integrated Approach to TOD Planning Elements”, *Journal of Korea Spatial Information Society*, 20(3): 15-25.
 28. 통계청, 2019. 「장래인구추계: 2020~2070년」, 대전. Statistics Korea, 2019. *Population Projections: 2020~2070*, Daejeon.
 29. 현준용·김재익, 2014. “대중교통이용률과 직주균형 수준이 통근 통행에 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, 2020. 「2020년 국가 온실가스 인벤토리 보고서」, 세종. Ministry of Environment, 2020. *National Inventory Report*, Sejong.
 31. 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.
 32. Churkina, G., 2016. “The Role of Urbanization in the Global Carbon Cycle”, *Frontiers in Ecology and Evolution*, 3(144).
 33. Ewing, R. and Cervero, R., 2010. “Travel and the Built Environment: A Meta-analysis”, *Journal of the American planning association*, 76(3): 265-294.
 34. Kockelman, K., 1997. “Travel Behavior as Function of Accessibility, Land Use Mixing, and Land Use Balance: Evidence from San Francisco Bay Area”, *Transportation Research Record*, 1607(1): 116-125.
 35. Leck, E., 2006. “The Impact of Urban Form on Travel Behavior: A Metaanalysis”, *Berkeley Planning Journal*, 19: 37-58.
 36. Salon, D., Boarnet, M.G., Handy, S., Spears, S., and Tal, G., 2012. “How Do Local Actions Affect VMT? A Critical Review of the Empirical Evidence”, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 17(7): 495-508.
 37. Seto, K.C., Dhakal, A., Bigio, H., Blanco, G.C., Delgado, D., Dewar, L., Huang, A., Inaba, A., Kansal, S., Lwasa, J.E., McMahon, D.B., Muller, J., Murakami, H., and Ramaswami, A., 2014. “Human Settlements, Infrastructure and Spatial Planning”, in *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*, edited by Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, New York: Cambridge University Press.
 38. World Economic Forum, 2021. *The Global Risks Report 2021 16th Edition*, Geneva.
 39. Zhang, H., Peng, J., Wang, R., Zhang, J., and Yu, D., 2021. “Spatial Planning Factors that Influence CO2 Emissions: A Systematic Literature Review”, *Urban Climate*, 36: 100809.
 40. 2050 탄소중립, 2021. “국외 탄소중립 현황”, <https://www.gihoo.or.kr/netzero/intro/intro0401.do>
2050 Carbon Neutral, 2021. “Overseas Carbon Neutrality Status”, <https://www.gihoo.or.kr/netzero/intro/intro0401.do>
 41. IPCC, 2021, August 6. “Climate Change 2021: The Physical Science Basis”, The Intergovernmental Panel on Climate Change, <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
 42. OECD. Stat, 2021, Dec 11. “Metropolitan Areas”, <https://stats.oecd.org/Index.aspx?DataSetCode=CITIES>

Date Received 2021-09-23
Date Reviewed 2021-11-16
Date Accepted 2021-11-16
Date Revised 2021-11-25
Final Received 2021-11-25