

First-mile과 Last-mile을 고려한 자유 주차방식 (Free-floating) 개인형 이동장치 공유 서비스 권역 및 운영대수 결정

Determination of Service Areas and Operating Numbers for Free-floating Personal Mobility Sharing Services

한 상 옥* · 김 동 규** · 문 세 동***

* 주저자 : 서울대학교 건설환경공학부 박사수료
** 공저자 : 서울대학교 건설환경공학부 교수, 서울대학교 건설환경종합연구소 겸임연구원
*** 교신저자 : 서울대학교 건설환경종합연구소 연수연구원

Sang-Wook Han* · Dong-Kyu Kim** · Sedong Moon***

* Ph. D. Candidate, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Seoul Nat'l Univ.
** Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Seoul Nat'l Univ.
Adjunct Professor, Institute of Construction and Environmental Engineering, Seoul Nat'l Univ.
*** Postdoctoral Researcher, Institute of Construction and Environmental Engineering, Seoul Nat'l Univ.

† Corresponding author : Sedong Moon, worldeast@snu.ac.kr

Vol. 23 No.2(2024)
April, 2024
pp.106~118

pISSN 1738-0774
eISSN 2384-1729
<https://doi.org/10.12815/kits.2024.23.2.106>

Received 18 December 2023
Revised 6 January 2024
Accepted 26 February 2024

© 2024. The Korea Institute of Intelligent Transport Systems. All rights reserved.

요 약

개인형 이동장치에 대한 관심은 스마트 모빌리티 서비스에서 first-mile 및 last-mile 중요성이 증가함에 따라 높아졌다. 본 연구는 first-mile 및 last-mile 문제를 해결하기 위해 자유 주차방식 (free-floating) 개인형 이동장치 공유 서비스 권역 설정 방법론을 제시하고 선정된 공유 서비스 권역을 대상으로 최적의 개인형 이동장치 운영 대수 결정을 목표로 한다. 인구 데이터, 스마트 카드 데이터, 건물 데이터를 사용하였으며, 개인형 이동장치 데이터를 이용하여 연령별, 거리별 이용률을 반영하여 잠재수요를 추정하였다. 추정된 잠재수요와 함께 대중교통 정류장과 건물의 위치를 기반으로 개인형 이동장치 공유 서비스 권역을 설정하였다. 인천 영종도를 대상으로 제안된 방법론을 적용한 결과 거주지가 밀집된 지역과 여행객들이 많은 해변 근처가 개인형 이동장치 공유 서비스 권역으로 선정되었다. 거주지가 밀집된 서비스 권역의 개인형 이동장치 운영대수는 1,022대, 해변 근처 서비스 권역의 개인형 이동장치 운영대수는 269대로 결정되었다.

핵심어 : 자유 주차방식 개인형 이동장치 공유, First-mile and last-mile, 개인형 이동장치

ABSTRACT

Interest in personal mobility has increased with the growing significance of first-mile and last-mile connectivity in smart mobility services. This study aims to propose a methodology for setting the service area of free-floating personal mobility sharing services and determining the optimal fleet size for the selected shared service area to address first-mile and last-mile challenges. We utilize population data, smart card data, and building data. Additionally, we estimate latent demand by incorporating age-specific and distance-specific utilization rates based on personal mobility device

data. Along with the latent demand, we determine the service area based on locations of transit stops and buildings. We apply the proposed methodology to Yeongjong Island, Incheon. As a result, dense residential areas and popular beachside locations are designated as personal mobility sharing service areas. The fleet size for personal mobility in the dense residential service area is determined to be 1,022 units, while the fleet size for the beachside service area is set at 269 units.

Key words : Free-floating personal mobility sharing, First-mile and last-mile, Personal mobility

I. 서 론

편리하고 효율적인 통행에 대한 승객의 요구를 충족시키기 위해 출발지에서 첫 번째 주수단 (대중교통 등)을 이용하기 위해 통행하는 경로 (first-mile) 및 마지막 주수단에서 하차 후 목적지까지 통행하는 경로 (last-mile)의 통행시간을 줄이는 것은 중요하다 (Choi and Jung, 2020). First-mile 및 last-mile 문제 해결을 위한 방법으로 자전거 또는 개인형 이동장치 공유 서비스가 제안되고 있다 (Kim et al., 2019). 그 중에서 개인형 이동장치(personal mobility; PM)는 전기로 구동되기 때문에 이용자의 힘이 들지 않아 first-mile과 last-mile 개선을 위한 대표적인 수단으로 주목받고 있다 (Gutiérrez and García-Palomares, 2008). 이러한 편리함 때문에 BIRD, LIME 및 SPIN과 같은 많은 기업들이 개인형 이동장치 공유 서비스를 제공하고 있으며, 운영의 편의성 및 효율성을 위해 공유 서비스 권역을 결정하여 서비스를 제공하고 있다.

개인형 이동장치 공유 서비스를 도입할 때 서비스 권역 설정과 운영 대수 결정은 중요한 문제이다. 자유 주차방식 (free-floating) 개인형 이동장치 공유 서비스의 경우 대여소에 개인형 이동장치를 반납하지 않기 때문에 어느 곳에서나 대여 또는 반납할 수 있다. 이러한 특징에 의하여 개인형 이동장치 공유 서비스 권역이 설정되지 않는다면 이용 범위가 넓어질 수 있고 정해진 운영 대수로 수요를 충족시킬 수 없는 경우가 발생하여 서비스의 질이 떨어질 수 있다. 따라서 자유 주차방식 개인형 이동장치 공유 서비스에서 서비스 권역 설정은 필수적이다. 먼저 공유 서비스 권역 설정은 이용 수요를 충족시키고 서비스의 경쟁력을 확보하는 데 중요한 문제이므로, 지역 특성, 교통 수요 및 개인형 이동장치 이용자 특성을 고려하여 최적의 서비스 권역을 결정해야 한다 (Karimpour et al., 2023). 또한 최적의 개인형 이동장치 운영 대수 결정은 자원 활용과 수익성을 향상시키며 경쟁력을 확보하는 핵심이므로, 운영 효율이 최대화될 수 있는 운영 대수를 산정해야 한다 (Zhang and Meng, 2019). 이러한 전략적 의사 결정은 개인형 이동장치 공유 시장에서 경쟁 우위를 확보할 수 있도록 하며, 서비스의 성공을 보장하는 핵심 요소로 부각된다.

본 연구에서는 first-mile 및 last-mile 통행에 초점을 맞춰 개인형 이동장치 공유 서비스의 권역 설정 방법을 제시하고 선정된 서비스 권역을 대상으로 최적의 운영 대수를 결정하는 것을 목적으로 한다. 여기서 최적이란 지속가능한 운영을 위한 개인형 이동장치의 최소 운영 대수를 의미한다. 기존 연구에서는 분석 편의상 공공 자전거와 같이 정해진 대여소가 있는 시스템으로 운영되는 공유 서비스를 다루는 경우가 많았고, 이러한 연구에서 대여소의 위치는 주로 수요가 많이 발생하는 대중교통 정류장 중심으로 결정되었다. 하지만 대여소가 있는 시스템의 경우 통행의 시작과 끝에서 반드시 이용자가 대여소로 가야 하는 불편함이 있다. 반면 자유 주차방식 (free-floating)에서는 출발지 근처에 있는 개인형 이동장치를 이용하고 목적지 근처에 반납을 하면 된다. 자유 주차방식에서는 대여소의 위치 선정은 필요하지 않고, 공유 서비스 권역과 최적의 운영 대수를 결정하는 것이 더 중요하며, 서비스 권역 설정을 위해 잠재수요를 추정하는 것은 필수적이다. 이를 위해 본 연구에서는 건물 데이터의 연면적 정보를 이용하여 건물의 개인형 이동장치 도착 통행량을 추정하였다. 또한 기존 연구와 마찬가지로 스마트 카드 데이터에 명시된 승차 인원을 이용하여 정류장의 개인형 이

동장치 도착 통행량을 추정하였다. 현대자동차가 실시한 시범 프로젝트의 개인형 이동장치 데이터를 이용하여 연령과 거리에 따른 개인형 이동장치 이용률을 계산한다. 개인형 이동장치 도착 통행량과 연령별, 거리별 이용률을 이용하여 개인형 이동장치의 잠재수요를 산정하고, 이를 바탕으로 공유 서비스 권역을 결정한다. 서비스 권역이 설정된 뒤에는 자유 주차방식의 특징을 반영하여 개인형 이동장치를 이용할 때와 이용하지 않을 때의 통행시간 차이를 계산하여 최적의 개인형 이동장치 운영 대수를 결정한다.

II. 선행연구 고찰

지금까지 서비스 권역 분석 및 설정 연구는 주로 대중교통에 대해서 진행되어왔다. 대중교통 정류장을 중심으로 특정 반경을 갖는 권역을 설정한 뒤 해당 권역 내에 거주하는 인구수를 계산하는 방법이 서비스 권역 분석 방법으로 주로 사용되었다 (Murray, 2001). 일반적으로 계산의 간편함을 위하여 정류장에서의 직선 거리를 기준으로 일정 반경 내에 있는 지역을 서비스 권역으로 설정하지만, 도로 네트워크를 적용하여 실제 이동하는 경로에 따라 서비스 권역을 설정하는 것이 서비스 권역 반경이 과대 추정되는 것을 방지할 수 있다 (Gutiérrez and García-Palomares, 2008). 격자형의 도로망이 불규칙적으로 구성된 도로망보다 대중교통 승객들이 더 대중교통에 접근하기가 수월한 것으로 나타났다 (Hsiao et al., 1997). 접근성은 특정 위치 또는 활동에 접근하는 편리성을 의미하며, 편리성은 보통 통행시간으로 평가된다 (Ding et al., 2015). 서비스 권역은 이산 선택 모형, 중력 모형 등을 통한 접근성 평가를 적용하여 설정된다. 이산 선택 모형에서는 각 개인의 접근 통행에 대한 효용을 계산하여 접근성을 평가하나 (Gulhan et al., 2013), 설문조사 데이터가 필요한 단점이 있다. 중력 모형은 거리와 비용 등을 고려한 decay function을 적용하여 접근성을 평가한다 (Rodrigue, 2020). Two-step floating catchment area method (2SFCA)은 대중교통 정류장의 공급과 수요를 모두 고려하여 서비스 권역의 경계를 결정하는 방법이다 (Karimpour et al., 2023).

개인형 이동장치 공유 서비스의 이용률에 영향을 주는 요인과 이를 이용하여 수요예측을 진행한 연구는 다양하다. 우선 개인형 이동장치 공유 서비스 이용수요 예측 연구 방법론은 크게 두 가지로 나뉜다. 회귀모형을 이용하여 수요 예측을 진행한 연구 (Lee et al., 2019; Yang et al., 2020)와 딥러닝을 이용하여 수요 예측을 진행한 연구이다 (Ham et al., 2021; Song et al., 2023). Lee et al.(2019)에서 다중 로그 회귀 모형을 이용하여 분석한 결과 20대에서 40대 연령의 비율이 높을수록, 인구밀도가 높을수록, 소득이 낮을수록 개인형 이동장치 공유 서비스 이용량이 높은 것으로 나타났다. Cherry and Cervero(2007)에서는 나이가 많고 남성일 때 개인형 이동장치를 선택할 가능성이 높은 것으로 나타났다. Choi and Jung(2020)에서는 설문조사를 통해 개인형 이동장치 공유 서비스에 영향을 미치는 요인을 분석한 결과, 이용 요금이 낮고, 자전거 전용도로가 존재하며, 지하철 접근수단이 버스 또는 택시인 경우 개인형 이동장치 공유 서비스 이용 의사가 높아지는 것을 확인할 수 있었다.

수요 대비 개인형 이동장치 공급이 과도하게 많으면 불필요한 운영 비용이 늘어난다. 개인형 이동장치 공유 서비스 경쟁력을 확보하기 위해서는 수요-공급 불균형을 최소화해야 한다 (Zhang and Meng, 2019). Gu et al. (2019)은 1,252만명의 인구가 거주하는 중국 선전시에 대해 분석한 결과, 1,000명 당 13대의 공유 개인형 이동장치를 할당하는 것이 효율적이라고 제안하였다. Zhang and Liu(2021)에서는 개인형 이동장치 공유 서비스를 지하철과의 연계 수단으로 간주하고, 운영 수익 최대화를 목적으로 개인형 이동장치 공유 서비스 가격과 운영 대수를 결정하였다. Luo et al.(2020)에서는 개인형 이동장치 공유 서비스 지속가능성을 염두에 두고 온실 가스 배출을 줄이기 위하여, 차량으로 진행되는 재배치를 최소화하면서 적절한 개인형 이동장치 운영 대수를 찾고자 하였다.

기존 연구에서는 개인형 이동장치 서비스 권역 설정을 위한 수요예측 및 이를 기반으로 한 개인형 이동장치 운영 대수 산정연구가 진행되지 않았다. 또한 건물의 통행량을 고려하지 않았다. 본 연구에서는 대중교통 정류장과 건물의 통행량을 계산하고 개인형 이동장치 데이터를 이용하여 잠재수요를 추론한 뒤 개인형 이동장치 서비스 권역을 설정한다. 이를 기반으로 개인형 이동장치 운영 대수를 결정하였다.

Ⅲ. 연구방법론

본 연구에서는 first-mile 및 last-mile의 통행시간 개선을 위한 자유 주차방식 개인형 이동장치 공유 서비스 권역을 결정하는 방법론을 제안한다. 이를 위해 먼저 대중교통 정류장의 승차 인원, 건물별 거주인구 또는 연면적, 연령대별 인구 분포를 바탕으로 정류장과 건물의 개인형 이동장치 통행량을 추정한다. 그리고 정류장과 건물 사이의 거리를 고려하여 둘 사이의 개인형 이동장치 잠재수요를 추정한다. 본 연구에서의 잠재수요는 정류장과 건물을 기준으로 한 지역 내 잠재적인 개인형 이동장치 이용 수요 분포로 간주한다. 추정된 잠재수요를 기반으로 건물을 출발지점으로 하고 목적지를 정류장으로 하는 first-mile 통행의 관점에서 서비스 권역을 설정하고, 정류장을 출발지점으로 하고 목적지를 건물로 하는 last-mile 통행의 관점에서 서비스 권역을 설정한다. 그리고 first-mile과 last-mile 통행의 관점에서 설정한 각각의 서비스 권역을 토대로 최종 서비스 권역을 결정한다. 최종 서비스 권역을 결정한 후에는 개인형 이동장치 도입 대수에 따른 총 통행시간의 감소를 산정하고 이를 바탕으로 최적의 개인형 이동장치 운영 대수를 결정한다.

1. 정류장별 및 건물별 통행량 추정

개인형 이동장치의 잠재수요 추정을 위해서는 우선 건물에서 출발하고 정류장으로 도착하는 통행량과 정류장에서 출발하고 건물로 도착하는 통행량을 계산한다. 도착 통행량만을 고려하는 이유는 건물에서 출발한 통행은 대중교통 정류장이 도착지점이고, 정류장에서 출발한 통행은 건물이 도착지점이기 때문에 중복을 방지하기 위함이다. 본 연구에서 정류장의 전체 도착 통행량은 스마트카드 데이터에 명시된 연령대별 승차 인원으로 간주한다. 건물의 전체 도착 통행량은 해당 건물의 거주인구 (거주지 건물) 또는 연면적 (비거주지 건물)에 통행원단위를 곱하여 산정한다. 거주지 건물의 거주인구는 건물의 연면적에 비례한다고 가정하였으며, 해당 건물이 속한 집계구의 인구에 해당 건물이 차지하는 연면적의 비율을 곱하여 추정한다.

본 연구에서는 개인형 이동장치 이용률이 연령대에 따라 달라진다고 가정한다. 이에 따라 정류장에서의 개인형 이동장치 도착 통행량은 정류장의 전체 도착 통행량 (정류장 승차 승객수)를 연령대별로 구분한 뒤에 연령대별 개인형 이동장치 이용률을 곱하여 계산한다 (Equation 1).

$$N^s = \sum_a pass^s(a) \times p_{age}(a) \dots\dots\dots (1)$$

여기서 N^s 는 정류장 s 의 개인형 이동장치 도착 통행량, $pass^s(a)$ 는 정류장 s 의 전체 도착 통행량 중 연령대 a 에 해당하는 통행량, $p_{age}(a)$ 는 연령대 a 의 개인형 이동장치 이용률이다.

건물로의 개인형 이동장치 도착 통행량은 건물의 전체 도착 통행량을 연령대별로 구분한 뒤에 연령대별 개인형 이동장치 이용률을 곱하여 계산한다 (Equation 2). 본 연구에서 사용한 건물 데이터에는 건물 내 인구 연령분포가 명시되지 않은 관계로, 건물이 속해있는 행정동의 연령별 인구분포를 건물 내 인구 연령분포로 가정한다.

$$N^b = \sum_a (pass^b \times r_{age}^b(a)) \times p_{age}(a) \dots\dots\dots (2)$$

여기서 N^b 는 건물 b 의 개인형 이동장치 도착통행량, $pass^b$ 는 건물 b 의 전체 도착 통행량을 의미한다. $r_{age}^b(a)$ 는 건물 b 가 속한 행정동의 연령대 a 의 인구 비율을 나타낸다.

2. 정류장별 및 건물별 잠재수요 산정

앞서 Equation 1, 2에 따라 산정된 개인형 이동장치 도착 통행량은 연령대별 개인형 이동장치 이용률만을 고려한 것이며, 실제로는 거리, 요금 등에 따라서도 개인형 이동장치 이용률이 달라진다. 데이터에 기반한 개인형 이동장치의 거리에 따른 이용률은 이미 부과되는 이용요금의 영향이 반영된 결과이다. 따라서 별도로 요금에 대한 영향을 고려하지 않았다. 따라서 본 연구에서는 앞서 산정된 개인형 이동장치 도착 통행량에 거리에 따른 개인형 이동장치 이용률을 곱하고 이를 건물별 또는 정류장별로 합산함으로써 정류장별 및 건물별 개인형 이동장치 잠재수요를 산정한다. 정류장 잠재수요 (Equation 3)는 네트워크 내 모든 건물에서 해당 정류장을 도착지로 하는 거리에 따른 도착 통행량 합계이며, 건물 잠재수요 (Equation 4)는 네트워크 내 모든 정류장에서 해당 건물을 도착지로 하는 거리에 따른 도착 통행량 합계이다. 잠재수요는 해당 지점까지 개인형 이동장치를 이용하여 이동할 가능성을 반영한 기댓값을 나타내므로 실제 이동수요와는 차이가 있다.

$$D(s) = \sum_b p_{dis}(d(s,b))N^b \dots\dots\dots (3)$$

$$D(b) = \sum_s p_{dis}(d(b,s))N^s \dots\dots\dots (4)$$

여기서 $D(s)$ 는 정류장 s 의 개인형 이동장치 잠재수요, $D(b)$ 는 건물 b 의 개인형 이동장치 잠재수요, $d(s,b)$ 와 $d(b,s)$ 는 각각 정류장 s 와 건물 b 사이 거리, 정류장 b 와 건물 s 사이 거리를 나타내며, $p_{dis}(*)$ 는 거리에 따른 개인형 이동장치 이용률을 의미한다.

3. 개인형 이동장치 서비스 권역 설정

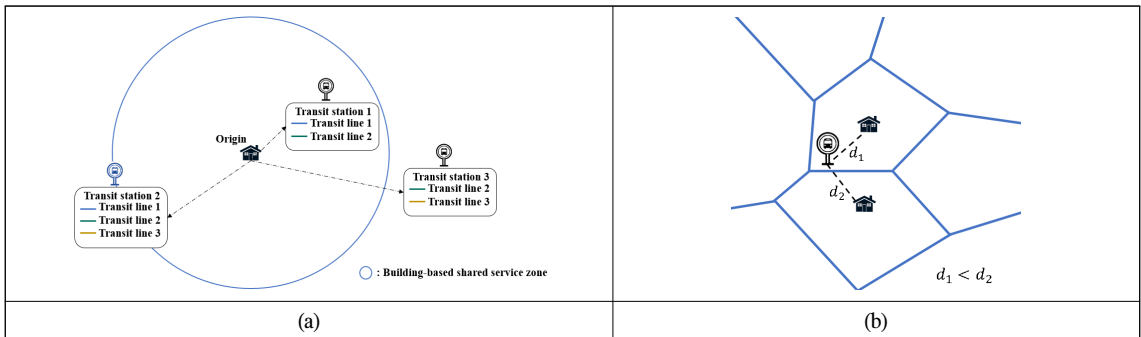
본 연구에서는 정류장을 도착지로 하는 first-mile 통행 관점에서의 정류장 기반 서비스 권역과 건물을 도착지로 하는 last-mile 통행 관점에서의 건물 기반 서비스 권역을 각각 설정하고, 이 둘의 공통 부분을 최종 서비스 권역으로 설정한다. 결정된 서비스 권역은 운영 효율화를 위한 최소한의 범위를 의미한다.

정류장 기반 서비스 권역을 설정하는 방법은 다음과 같다. 먼저 정류장 잠재수요가 중앙값을 초과하는 정류장들을 선정한다. 선정된 정류장들을 기준으로 일정 반경의 버퍼를 형성하고, 형성된 버퍼들의 집합을 정류장 기반 서비스 권역으로 설정한다. 이때 버퍼의 반경을 결정하기 위해서는 대중교통 환승 없이 어느 건물에서 정류장까지 도달했는지 알아야 하나, 스마트카드 데이터에는 이에 관한 정보가 없으므로 다음과 같은 가정을 통해 버퍼의 반경을 결정한다. 우선, 본 연구에서는 대중교통 이용자들이 이용하려는 노선상의 정류장 중 가장 가까운 정류장을 선택한다고 가정한다. 다음으로 개인형 이동장치 이용자들이 대중교통 정류장으로 접근할 수 있는 공간적 범위에 관한 선행연구가 부족한 관계로, 본 연구에서는 개인형 이동장치를 이용하여 대중교통 정류장으로 접근할 수 있는 최대 거리가 자전거와 유사한 수준이라고 가정하며, 그 거리는

3km이다 (Djurhuus et al., 2016). 출발지점인 건물에서 정류장까지의 거리가 최대 접근 거리인 3km보다 가깝다면 개인형 이동장치를 이용할 수 있고, 그보다 멀다면 개인형 이동장치를 이용하지 않고 다른 대중교통 노선과의 환승을 통해 해당 노선을 이용한다고 가정한다. 이에 따라 각 건물마다 최대 접근 거리인 3km 내에 있는 정류장들을 먼저 필터링한 뒤, 대중교통 노선을 최대한 많이 포함할 수 있는 최소의 반경을 계산하고, 이렇게 계산된 최소 반경들의 평균값을 정류장 기반 서비스 권역 설정을 위한 버퍼의 반경으로 한다.

<Fig. 1> (a)는 정류장 기반 공유 서비스 권역 설정 예시이다. 노선 1, 2, 3의 경우 개인형 이동장치 데이터의 최대 접근 거리인 3km보다 가까운 노선이며 그 외 노선은 개인형 이동장치를 통해 접근하려 하지 않는다고 가정하였다. 노선 1과 2를 이용하고자 하는 승객의 경우 노선 1과 2를 동시에 포함하고 있는 가장 가까운 대중교통 정류장인 1번 정류장을 이용한다. 노선 3을 이용하고자 하는 승객의 경우 노선 3을 포함하고 있는 가장 가까운 대중교통 정류장인 2번 정류장을 이용한다. 모든 노선을 포괄하는 최소의 서비스 권역 반경은 출발지와 대중교통 정류장 2 사이의 거리로 설정해야 한다.

건물 기반 서비스 권역을 설정하는 방법은 다음과 같다. 먼저 대중교통 이용자는 목적지 (건물)와 가장 가까운 정류장에서 하차한다는 가정으로 네트워크에 속한 모든 건물을 기반으로 보로노이 다각형(Voronoi polygon)을 생성한다. <Fig. 1> (b)와 같이 보로노이 다각형은 주어진 점 (건물)들로부터 각 점 (건물)까지의 거리가 같은 지점들을 연결하여 만들어지는 다각형이다. 따라서 보로노이 다각형 안에 있는 건물은 해당 다각형 내부에 있는 임의의 정류장에 대해 그 정류장과 가장 가까운 건물이 된다. 건물들을 기반으로 생성된 보로노이 다각형들 중에서, 건물 잠재수요가 중앙값을 초과하는 건물이 포함된 보로노이 다각형들을 건물 기반 개인형 이동장치 서비스 권역으로 설정한다.



<Fig. 1> Examples of the method for determining the radius of a station-based buffer (a) and building-based shared service area (Voronoi diagram) (b)

4. 개인형 이동장치 운영대수 결정

개인형 이동장치 운영 대수를 결정하는 방법은 다음과 같다. 먼저 개인형 이동장치의 도입 효과는 개인형 이동장치를 이용하지 않았을 때와 이용하였을 때의 정류장 및 건물 접근시간 차이를 통해 평가할 수 있다. 이를 모든 건물과 정류장에 대해 합산하여 총 통행시간 차이 (total travel time difference; TTD)를 산정한다 (Equation 8). TTD를 개인형 이동장치 운영 대수에 따른 개인형 이동장치 공유 효과 평가 지표로 활용한다.

$$TTD = \sum_b \sum_s \{ (TT_w(b,s) - (TT_w(b,p) + TT_{PM}(p,s))) + (TT_w(s,b) - (TT_w(s,p) + TT_{PM}(p,b))) \} \dots \dots \dots (8)$$

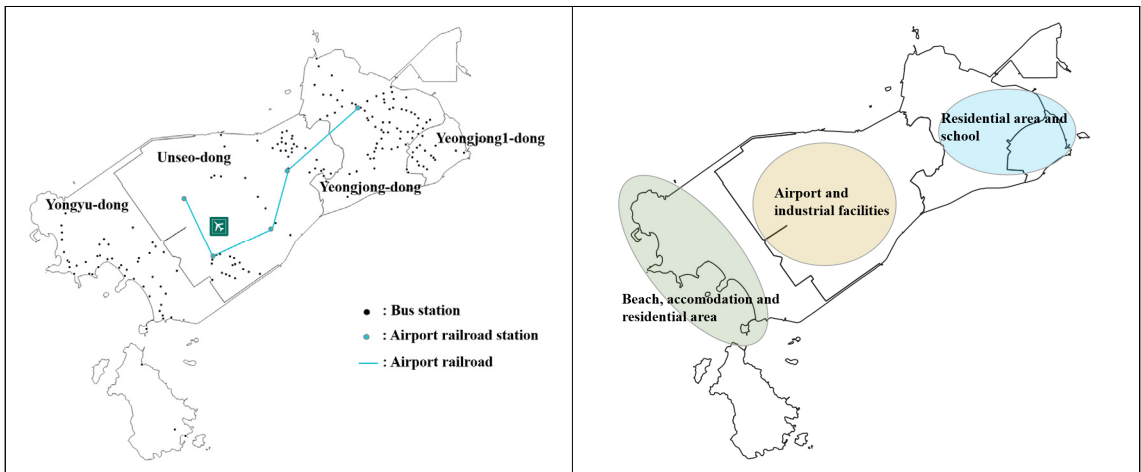
여기서 b 는 건물, p 는 개인형 이동장치, s 는 정류장을 나타내는 기호이다. $TT_w(*,*)$ 는 도보로 두 지점을 이동하는 데에 걸리는 시간이고 $TT_{PM}(*,*)$ 는 개인형 이동장치로 두 지점을 이동하는 데에 걸리는 시간이다.

본 연구에서는 개인형 이동장치가 권역 내 임의의 지점에 위치해 있다고 가정하며, 개인형 이동장치의 개수를 변경하면서 TTD를 산정한다. 즉, 결정된 서비스 권역 내에 일정 개수의 점을 무작위 위치에 배치하고 이를 개인형 이동장치 주차 위치로 간주한다. 이때 오차율이 5% 내에서 유지될 때까지 개인형 이동장치 배치 및 TTD 산정을 반복한다. 반복을 통해 얻어진 개인형 이동장치 개수에 따른 TTD의 경향성을 살펴보기 위해 3차 다항식 피팅 곡선 (fitted curve)을 구한다. TTD는 운영대수가 늘어나면 $TT_w(b,p)$ 와 $TT_w(s,p)$ 가 감소하기 때문에 증가하다가 어느 시점부터는 증가율이 감소하고 더 이상 증가하지 않게 된다. 포화상태는 TTD의 3차 다항식 피팅 곡선의 미분계수 값이 0.05 미만이 될 때로 간주하였고, 포화 시작 지점을 최적의 개인형 이동장치 대수로 결정하였다. 이렇게 설정된 개인형 이동장치 운영 대수는 운영자들이 개인형 이동장치 공유 서비스를 유지하기 위한 최소 운영대수이다.

IV. 분석자료 및 네트워크

1. 분석 대상지

본 연구의 분석 대상지인 영종도는 인천광역시 중구에 속한 지역으로, 영종도 내 행정동은 영종동, 영종1동, 운서동, 용유동 4개로 이루어져 있다. 영종도에서는 총 22개의 버스 노선과 공항철도가 운영되고 있으며, 버스 정류장 및 공항철도 노선은 <Fig. 2> (a)와 같다. 영종도 내 공항철도의 배차간격은 첨두 6~10분, 비첨두 8~16분으로 상대적으로 짧으나, 버스의 평균 배차간격은 31.5분으로 길어 대중교통을 이용하기가 매우 불편하다. <Fig. 2> (b)에서 볼 수 있는 것과 같이 주거지와 학교는 주로 영종1동과 영종동에 위치해 있고 운서동은 인천국제공항이 위치한 지역으로, 다수의 산업 시설이 위치해있다. 용유동에는 해변, 숙박 시설 및 주거 지역이 있다.



<Fig. 2> A map of Yeongjong Island, Incheon: (a) four administrative districts and public transportation station in Yeongjong Island, (b) Distribution of residential areas, schools, airports, beaches, and accommodation facilities on Yeongjong Island

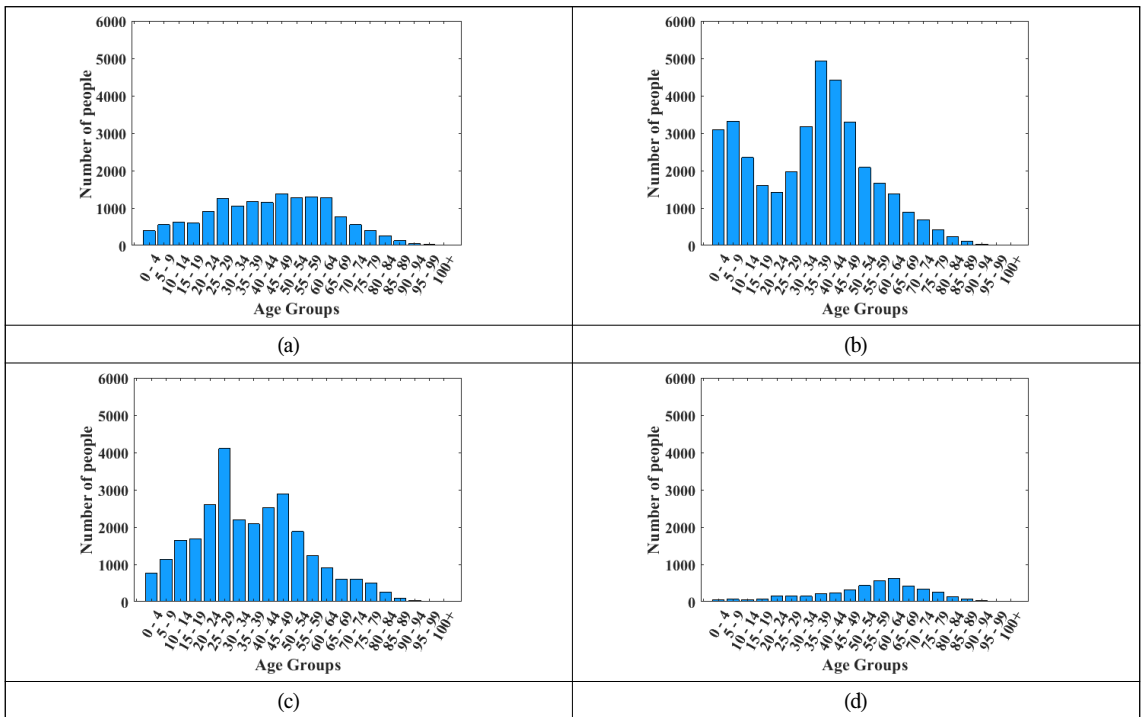
2. 분석자료

집계구는 행정구역 체계에서 사용되는 지리적 단위로, 인구 통계 및 행정 데이터 수집 및 분석에 활용되는 가장 작은 지역 단위를 나타내며 이를 이용하여 인구수를 집계하였다. 영종도는 522개 집계구로 구분되어 있다. 정류장의 위치와 승객수는 스마트카드 데이터를 이용하였고 건물 데이터는 국가공간정보포털의 2019년 데이터를 이용했다. 건물의 총 개수는 9,457개, 정류장의 총 개수는 359개이다. 대중교통 승객수는 2017년 5월 16일의 스마트카드 데이터를 이용했으며 121,654명의 승객이 승하차하였다. 주거지역 인구 1인당, 비주거지역 연면적 1000m²당 통행원단위는 <Table 1>과 같다 (Korea Transport DataBase, 2012).

<Table 1> Conversion factor (Korea Transport DataBase, 2012)

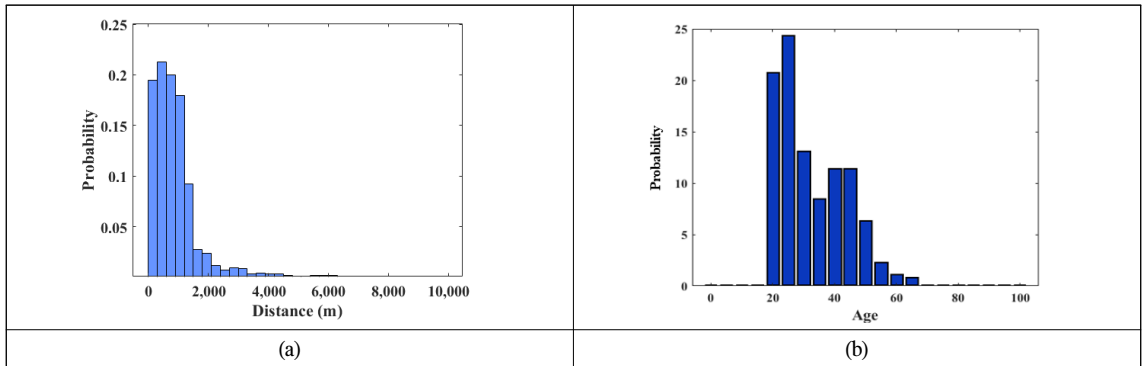
Trips from residence (trips/day-person)	Trips from commercial Region (trips/thousand-squared meter-day)		
	Building for entertainment	Building for business	Accommodation
2.68	275.7	2,033.6	320.3

각 건물 내 인구 연령별 인구분포는 2019년 기준 각 행정동의 연령별 인구 분포 (Fig. 3)를 따른다고 가정하였다. 영종동의 경우 연령 평균은 42.9세, 표준편차는 20.2세이며, 영종1동의 경우 연령 평균은 33.9세, 표준편차는 19.9세이며, 운서동의 경우 연령 평균은 35.8세, 표준편차는 18.4세이며, 용유동의 경우 연령 평균은 53.8세, 표준편차는 16.9세이다.



<Fig. 3> Population Distribution of Administrative Districts on Yeongjong Island, 2019: (a) Yeongjong-dong, (b) Yeongjong 1-dong, (c) Unseo-dong, (d) Yongyu-dong

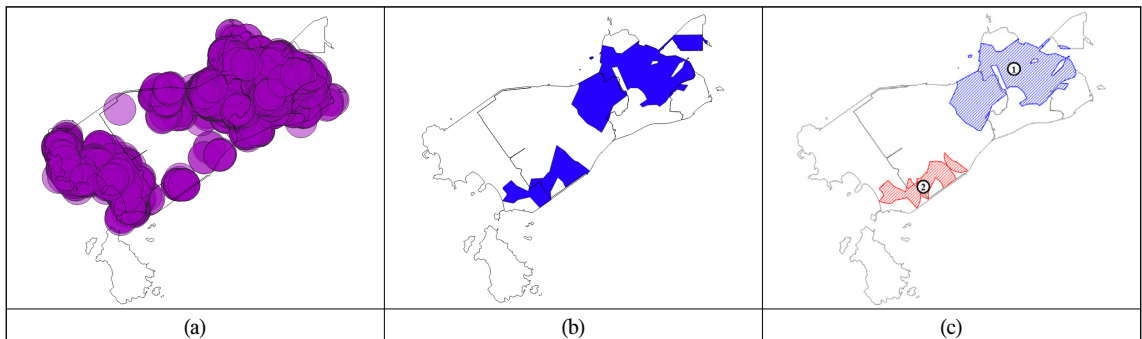
본 연구에서는 개인형 이동장치의 거리에 따른 이용률, 연령에 따른 이용률 도출을 위하여 현대자동차가 2019년 11월 1일부터 12월 2일까지 영종도에서 수행한 개인형 이동장치 시범 프로젝트인 I-ZET의 데이터를 사용하였다. First-mile과 last-mile 통행을 목적으로 하기 때문에 출발지와 목적지의 거리 차이가 10m 이내인 통행 (전체 데이터의 0.5%)은 분석 대상에서 제외하였다. 해당 기간동안 2,990명의 이용자가 I-ZET를 이용하였고, 이동거리의 평균은 971m, 표준편차는 140m로 나타났다. 거리에 따른 이용률은 이동거리가 300~600m 일 때 가장 높았고, 연령에 따른 이용률은 20대가 가장 높았다 (Fig. 4).



<Fig. 4> Personal mobility usage rate based on distance (a) and age (b)

V. 분석결과

영종도에 대하여 개인형 이동장치 공유 서비스 권역을 선정하 결과는 <Fig. 5>와 같다. <Fig. 5> (a)는 정류장 기반 서비스 권역이며, 이때 버퍼의 반경은 1,121m로 산정되었다. <Fig. 5> (b)는 건물 기반 서비스 권역이다. 최종 서비스 권역은 개인형 이동장치 공유 서비스 운영자들에게 운영을 위한 최소 권역 범위를 제시하기 위해 정류장 기반 서비스 권역과 건물 기반 서비스 권역의 교집합으로 선정되었다 (<Fig. 5> (c)). 최종 서비스 권역은 2개의 지역으로 구분할 수 있다. 서비스 권역 1 (<Fig. 5> (c)에서 ①)은 역으로부터 멀리 떨어진 건물과 총 연면적이 큰 아파트들이 많으며, 서비스 권역 2 (<Fig. 5> (c)에서 ②)는 정류장에서 해변으로

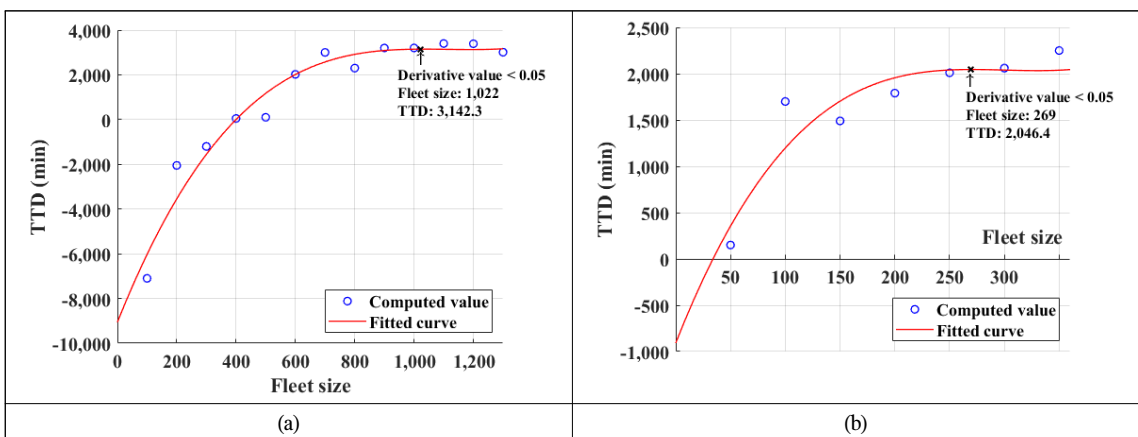


<Fig. 5> Personal mobility service area: (a) the station-based personal mobility service area, (b) the building-based personal mobility service area, and (c) the final personal mobility service area

가는 여행객들의 통행이 많다. 이러한 이유로 이들 지역에서는 first-mile 및 last-mile 관점에서의 개인형 이동장치 잠재수요가 모두 높게 나타났으며, 이에 따라 개인형 이동장치 서비스 권역으로 선정되었다. 서비스 권역 1의 면적은 25,592,877m²이며, 건물의 개수는 4,568개, 정류장의 개수는 157개이다. 서비스 권역 2의 면적은 7,045,742m²이며, 건물의 개수는 219개, 정류장의 개수는 22개이다. 서비스 권역 1의 잠재수요는 70,331명이며 서비스 권역 2의 잠재수요는 18,992명이다.

개인형 이동장치 운영 대수를 결정하기 위하여 도보 속도는 3km/h, 개인형 이동장치의 속도는 I-ZET의 데이터 내 개인형 이동장치 평균 속도인 7.6km/h로 설정하고 TTD를 계산하였다. 도보 속도의 경우 연령별로 다르기 때문에 연령대별 평균 도보 속도의 평균을 계산하여 본 연구에서의 도보 속도를 가정하였다 (Fitzpatrick et al., 2006). <Table 2>와 <Fig. 6>는 개인형 이동장치 운영 대수에 따른 민감도 분석 결과이며, X축은 개인형 이동장치 대수를 나타내고, Y축은 TTD 값을 나타낸다. <Fig. 6>의 (a)는 서비스 권역 1에 대한 TTD 그래프이며, <Fig. 6>의 (b)는 서비스 권역 2에 대한 TTD 그래프이다.

<Fig. 6>에서 볼 수 있듯이, 개인형 이동장치 대수가 증가함에 따라 TTD 값도 함께 증가하다가 포화상태에 도달한다. 포화상태는 TTD의 3차 다항식 피팅 곡선의 미분계수 값이 0.05 미만이 될 때로 간주하였고, 포화 시작 지점을 최적의 개인형 이동장치 대수로 결정하였다. 서비스 권역 1의 최적 개인형 이동장치 대수는 1,022대로 산정되었으며, 해당 지점에서 TTD는 3,142.3분으로 나타났다. 서비스 권역 2의 경우, 최적 개인형 이동장치 대수는 269대로 산정되었으며, 해당 지점에서 TTD는 2,046.4분으로 나타났다. 이는 서비스 권역 1에서는 도보만으로 이동했을 때보다 평균 3.1분 절약되었고 서비스 권역 2에서는 도보만으로 이동했을 때보다 평균 7.6분 절약되었다는 것을 나타낸다. First-mile 통행과 last-mile 통행 모두 개인형 이동장치를 이용하였을 경우에는 서비스 권역 1에서는 평균 6.2분, 서비스 권역 2에서는 평균 15.2분 절약된다는 것을 의미한다. 영종도 내 공항철도의 배차간격은 첨두 6~10분, 비첨두 8~16분이고, 버스의 평균 배차간격은 31.5분인 것을 고려했을 때, 개인형 이동장치를 이용하여 절약된 시간은 대중교통 통행을 충분히 개선할 것으로 사료된다. 서비스 권역 1의 잠재수요 대비 개인형 이동장치 배정 대수는 1,000명 당 14.5대, 서비스 권역 2의 잠재수요 대비 개인형 이동장치 배정 대수는 1,000명 당 14.1대이며, 이는 Gu et al.(2019)의 연구에서 제안된 1,000명 당 13대에 근접한 수치이다.



<Fig. 6> Results of the sensitivity analysis: (a) a graph of the personal mobility service area 1 and (b) a graph of the personal mobility service area 2

VI. 결 론

본 연구는 first-mile과 last-mile 문제 개선을 위해 자유 주차방식 (free-floating) 개인형 이동장치 공유 서비스 권역을 설정하고 개인형 이동장치의 운영 대수를 결정하는 것을 목적으로 하였다. 공유 서비스의 권역 설정을 위해 먼저 통행이 발생하는 정류장과 건물의 개인형 이동장치 잠재수요를 추정하였다. 정류장을 목적지로 하는 잠재수요는 정류장 승차 승객수에 연령별, 거리별 이용률을 곱하여 계산하였다. 건물을 목적지로 하는 잠재수요는 거주지와 비거주지로 구분한 뒤 통행 원단위를 적용하여 연령별, 거리별 이용률을 곱하여 추정하였다. 잠재수요 값이 중앙값을 초과하는 정류장과 건물을 기준으로 개인형 이동장치 서비스 권역을 결정하였다. 설정된 서비스 권역에서 최적의 개인형 이동장치 운영 대수 결정을 위해 개인형 이동장치 운영 대수에 따른 총 통행시간 차이의 민감도 분석을 시행하였다. 민감도 분석을 위해 서비스 권역 내 개인형 이동장치의 위치를 나타내는 임의의 점을 생성함으로써 자유 주차방식 시스템을 구현하였으며, 도보만을 이용할 때와 개인형 이동장치를 이용할 때의 통행시간 차이를 계산하였다.

잠재수요 추정을 위해 집계구 데이터, 행정동 인구 데이터, 스마트 카드 데이터, 건물 데이터를 사용하였으며, 현대자동차가 실시한 개인형 이동장치 시범 프로젝트 데이터를 이용하여 연령별, 거리별 통행 특성을 반영하였다. 인천 영종도를 분석 대상으로 설정하여 개인형 이동장치 공유 서비스 권역을 결정한 결과, 거주지가 밀집된 지역과 여행객들이 많은 해변 근처가 서비스 권역으로 선정되었다. 개인형 이동장치를 이용하여 통행시간을 6분~15분 절감 효과를 얻기 위해서는 1,000명 당 14대~15대의 개인형 이동장치를 배정하는 것이 공유 개인형 이동장치 서비스를 지속 가능하게 해준다.

본 연구는 개인형 이동장치 공유 서비스 운영자가 적절한 서비스 권역을 설정하고 최대 이익을 얻기 위한 운영 대수를 결정하는 데 도움을 줄 수 있으며, 개인형 이동장치 공유 서비스 분야의 새로운 시장 지역을 선택하고 운영 전략을 개발하는 데 기여할 수 있다.

본 연구에서는 건물 내 인구 연령 데이터가 부재하여 건물 내 인구 연령에 따른 인구분포를 행정동의 연령분포로 가정하였으나, 향후 연구에서 건물 내 인구 연령 데이터를 취득할 수 있다면 좀 더 정확한 결과를 얻을 수 있을 것이다. 또한 현재 국내외에서 다양한 개인형 이동장치 공유 서비스가 운영되고 있으며, 향후 연구에서 이들의 요금, 운영비용 등에 대한 데이터를 사용한다면 실제 통행행태를 기반으로 더욱 세부적인 분석을 수행할 수 있을 것으로 기대된다. 본 연구에서는 데이터 한계로 인해 피스톤 트립(대여, 반납 장소가 동일한 통행)은 제외하였으나, 출발지와 목적지 사이에 경유지가 있는 경우의 통행 경로 데이터를 확보할 수 있다면 피스톤 트립이 잠재수요 분포 산정, 운영대수 산정에 어떤 영향을 미치는지 세부적으로 연구할 수 있을 것이다. 그리고 도로의 경사도, 개인형 이동장치 이용 가능 도로 등에 대한 정보가 반영된 데이터가 확보된다면 버퍼가 아닌 네트워크 거리를 고려한 서비스 권역을 설정할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 공유 개인형 이동장치 통행 및 선호에 대한 경향성을 분석하고 개인형 이동장치의 수요 공급 불균형을 개선할 수 있는 전략을 반영하면 연구를 발전시킬 수 있을 것으로 생각된다. 더불어 자유 주차방식 개인형 이동장치 공유 서비스 권역 결정 이후 운영 결과와 스테이션 기반 개인형 이동장치 공유 서비스의 대여소 결정 이후 운영 결과를 비교하는 연구를 진행해볼 수 있다. 마지막으로 정류장 잠재수요를 선별하는 기준을 중앙값으로 설정하였는데 이후에는 평균과 같이 다양한 기준을 사용하여 비교해 볼 수 있을 것이다.

ACKNOWLEDGEMENTS

본 연구는 현대자동차 지원 인천 스마트시티 챌린지사업 마스터플랜 수립 용역과제의 데이터를 이용하여 수행하였습니다. 또한, 이 연구는 한국연구재단 BK21 PLUS 사업의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

REFERENCES

- Cherry, C. and Cervero, R.(2007), “Use characteristics and mode choice behavior of electric bike users in China”, *Transport Policy*, vol. 14, no. 3, pp.247-257.
- Choi, M. H. and Jung, H. Y.(2020), “A study on the influencing factor of intention to use personal mobility sharing services”, *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 38, no. 1, pp.1-13.
- Ding, Y., Zhou, J. and Li, Y.(2015), “Transit accessibility measures incorporating the temporal dimension”, *Cities*, vol. 46, pp.55-66.
- Djurhuus, S., Sten Hansen, H., Aadahl, M. and Glümer, C.(2016), “Building a multimodal network and determining individual accessibility by public transportation”, *Environment and Planning B: Planning and Design*, vol. 43, no. 1, pp.210-227.
- Fitzpatrick, K., Brewer, M. A. and Turner, S.(2006), “Another look at pedestrian walking speed”, *Transportation Research Record*, vol. 1982, no. 1, pp.21-29.
- Gu, Z., Zhu, Y., Zhang, Y., Zhou, W. and Chen, Y.(2019), “Heuristic bike optimization algorithm to improve usage efficiency of the station-free bike sharing system in Shenzhen, China”, *ISPRS International Journal of Geo-Information*, vol. 8, no. 5, p.239.
- Gulhan, G., Ceylan, H., Özuysal, M. and Ceylan, H.(2013), “Impact of utility-based accessibility measures on urban public transportation planning: A case study of Denizli, Turkey”, *Cities*, vol. 32, pp.102-112.
- Gutiérrez, J. and García-Palomares, J. C.(2008), “Distance-measure impacts on the calculation of transport service areas using GIS”, *Environment and Planning B: Planning and Design*, vol. 35, no. 3, pp.480-503.
- Ham, S. W., Cho, J. H., Park, S. and Kim, D. K.(2021), “Spatiotemporal demand prediction model for e-scooter sharing services with latent feature and deep learning”, *Transportation Research Record*, vol. 2675, no. 11, pp.34-43.
- Hsiao, S., Lu, J., Sterling, J. and Weatherford, M.(1997), “Use of geographic information system for analysis of transit pedestrian access”, *Transportation Research Record*, vol. 1604, no. 1, pp.50-59.
- Karimpour, A., Hosseinzadeh, A. and Kluger, R.(2023), “A data-driven approach to estimating dockless electric scooter service areas”, *Journal of Transport Geography*, vol. 109, 103579.
- Kim, S. H., Oh, S. C. and Choi, K. C.(2019), “Bike Travel Pattern Analysis for Station Free Bike Sharing System in Suwon”, *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 37, no. 2, pp.110-123.
- Korea Transport DataBase(2012), <https://www.ktdb.go.kr/www/contents.do?key=278>.
- Lee, M., Chow, J. Y. J., Yoon, G. and He, B. Y.(2019), “Forecasting e-scooter competition with direct

- and access trips by mode and distance in New York City”, *arXiv 2019*, arXiv preprint arXiv:1908.08127.
- Luo, H., Zhao, F., Chen, W. Q. and Cai, H.(2020), “Optimizing bike sharing systems from the life cycle greenhouse gas emissions perspective”, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 117, 102705.
- Murray, A. T.(2001), “Strategic analysis of public transport coverage”, *Socio-Economic Planning Sciences*, vol. 35, no. 3, pp.175-188.
- Rodrigue, J. P.(2020), *The geography of transport systems*, Routledge.
- Song, J. C., Hsieh, I. Y. L. and Chen, C. S.(2023), “Sparse trip demand prediction for shared E-scooter using spatio-temporal graph neural networks”, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 125, 103962.
- Yang, H., Zhang, Y., Zhong, L., Zhang, X. and Ling, Z.(2020), “Exploring spatial variation of bike sharing trip production and attraction: A study based on Chicago’s Divvy system”, *Applied Geography*, vol. 115, 102130.
- Zhang, F. and Liu, W.(2021), “An economic analysis of integrating bike sharing service with metro systems”, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 99, 103008.
- Zhang, J. and Meng, M.(2019), “Bike allocation strategies in a competitive dockless bike sharing market”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 233, pp.869-879.