



세종시 수요응답교통 통행수요의 시공간적 특성 탐색*

Exploring the Spatio-Temporal Patterns of Demand Responsive Transport Ridership in Sejong City

김수영¹ · 김문현² · 김태형³

Kim, Soo-Young · Kim, Moon-Hyun · Gim, Tae-Hyoung Tommy

Abstract

Demand-responsive transport (DRT) has gained momentum as a novel travel mode in cities owing to its route flexibility and user-friendliness. However, there remains a dearth of knowledge concerning the spatio-temporal patterns and role of DRT within urban areas. This study aims to investigate the role of DRT in an urban context by analyzing the spatial and temporal patterns of DRT services in Sejong City, South Korea, which is designed as a multi-centered, decentralized city. The results show that DRT helps to improve transportation efficiency, diversify travel destinations, and increase public transportation accessibility. During peak hours, DRT supplements public transport for commuting to and from work, significantly reducing travel time by 35.6% compared with public transport by reducing walking and waiting times. During off-peak hours, DRT covers sporadic travel demands across neighborhoods, particularly for destinations that are challenging to access using public transport. In addition, DRT effectively addresses travel demands in areas with limited public transport access. This study serves as a valuable resource for understanding the potential of urban DRT as an innovative public transport system.

주제어 수요응답교통, 온디맨드 대중교통, 유연한 대중교통, 지속가능한 도시교통, 세종시

Keywords Demand-Responsive Transport, On-Demand Public Transport, Flexible Public Transport, Sustainable Urban Transport, Sejong

1. 서론

최근 유연한 대중교통을 표방하며 등장한 수요응답교통(Demand Responsive Transport, DRT)에 대한 관심이 높아지고 있다. DRT는 경로유연성을 바탕으로 다양한 장소에서 발생하는 통행수요에 대응하는데(Mageean and Nelson, 2003;

Jokinen et al., 2011), 승차공유 기능과 결합하여 대중교통의 한계를 보완하고 승용차 의존도를 완화시킬 수 있어 도시교통의 지속가능성을 향상시키는 새로운 수단으로 주목받고 있다(Alonso-González et al., 2018; Coutinho et al., 2020; Haglund et al., 2019; Jokinen et al., 2019; Perera et al., 2020; Sanaullah et al., 2021; Berrada and Poulhès, 2021). 이에 많은 도시는

* 이 논문은 현대자동차의 DRT 실증 서비스인 셔틀 데이터를 지원받아 수행된 연구이며, 김수영(2023)의 석사학위논문 "수요응답교통(DRT) 통행수요의 시공간적 특성 분석: 세종시 셔틀 서비스 사례를 중심으로"를 수정·보완한 것이다.

** Director, Hyundai Motor Company (First Author: number00@gmail.com)

*** Visiting Associate Research Fellow, Seoul Institute (moonhyunk83@gmail.com)

**** Associate Professor, Graduate School of Environmental Studies, Integrated Program in Regional Studies and Spatial Analytics, Interdisciplinary Program in Landscape Architecture, Environmental Planning Institute, and Institute for Sustainable Development, Seoul National University (Corresponding Author: taehyoung.gim@snu.ac.kr)

DRT를 도입하여 대중교통의 한계를 극복하고 도시의 통행수요에 효과적으로 대응하는 대중교통체계로 자리 잡을 수 있을지 시도하고 있다(McLeod et al., 2017; Alonso-González et al., 2018; Haglund et al., 2019; Currie et al., 2020; Kaufman et al., 2021; Sanaullah et al., 2021).

초기의 DRT는 도시 교외화로 인한 저밀지역에서 기차역과 같은 대량운송 네트워크에 접근하는 대중교통의 보조수단으로 여겨졌다(Cervero and Beutler, 1999). 주로 공공에서 운영하였고, 장애인, 노인, 학생 등 대중교통 의존성이 높은 교통약자의 지역 내 생활이동에 효과적이었다(Bellini et al., 2003; Nelson and Phonphitakchai, 2012). 초기 DRT 연구의 대부분은 주 사용 대상인 교통약자의 이용자 특성에 초점을 두고 DRT 이용 경험에 대한 설문과 인터뷰를 통해 서비스 질을 향상하고자 하였다(Mageean and Nelson, 2003; Nelson and Phonphitakchai, 2012; Ryley et al., 2014).

스마트 기술을 활용하여 경로유연성과 이용편의성이 향상된 DRT 서비스가 도시에 등장한 것은 비교적 최근 일이다. 최근 연구는 도심 DRT 서비스 확장의 타당성을 확보하고 서비스 질을 향상하는 데 연구가 집중되었다. 예컨대, DRT 도입 타당성을 분석하기 위한 평가모델 개발(Kaufman et al., 2021), 기존 교통 대비 운영효율 검증을 위한 시뮬레이션(Jokinen et al., 2011; Berrada and Poulhès, 2021), 미시경제적 분석(Schwieterman, 2019)과 노선기반 대중교통과의 접근성 비교 연구(Alonso-González et al., 2018)가 수행되었다. 또한, 이용자 측면에서 이미 도시 교통 체계에 자리잡은 우버(Uber), 리프트(Lyft)와 같은 승차 호출 서비스를 중심으로 서비스 질 향상을 위한 논의가 다수 진행되었다(Young and Farber, 2019; Gehrke et al., 2019). 그러나 여전히 도시에 도입된 DRT의 이용 특성에 대한 실증 연구는 부족하며, 특히, 대중교통을 중심으로 계획된 도시에서 DRT가 어떠한 역할을 하는지에 대해서는 아직 밝혀진 바가 없다.

이에 이 연구는 다핵 분산형으로 조성된 세종시를 대상으로 DRT 이용의 시공간적 특성을 분석하고, 대중교통과의 이용 특성을 비교하여 도시계획적 함의를 도출함으로써 도심 DRT의 역할과 새로운 도시 교통체계로서의 가능성을 규명하고자 한다. 연구는 2021년 4월부터 세종시에서 운행되고 있는 '셔클'의 서비스 범위를 대상으로 수집된 데이터를 사용하였다. 셔클을 통해 수집된 인구통계 및 서비스 이용 시공간 데이터는 누가, 언제 주로 이용하였는지 확인하는 데 사용되었으며, 승하차 지점을 시각화하여 통행부하와 이동경로를 분석하였다. 시공간 정보는 토지이용 패턴에 기반하여 해석되었다. 또한, 구글 Directions API에서 추출한 대중교통 통행시간을 활용하여 고정 노선버스와 DRT 통행 패턴을 비교 분석하였다.

II. 이론적 배경 및 선행연구 고찰

1. 수요응답교통의 개념 및 특성

DRT는 승객의 요청에 따라 제공되는 이용자 중심의 주문형 운송이다. 비슷한 의미로 대중교통의 보완재로 접근하는 FPT(Flexible Public Transport; Potts et al., 2010), 정보통신기술을 접목한 주문형 서비스 관점의 ODT(On-Demand Transit; Sanaullah et al., 2021), 운행차량의 특성에서 비롯된 Micro-transit(Currie et al., 2020) 등으로 불리운다. DRT는 주로 수요가 고르지 않은 농어촌 등 저밀교외지역에서 주민들의 이동성 확보를 위한 대중교통의 보조수단이나 연계수단으로 취급되어 왔다(Potts et al., 2010; Mageean and Nelson, 2003; Rayle et al., 2016; McLeod et al., 2017). 보조수단으로써 운행 특성에 따라 고정노선으로 운행하는 버스와 개인화된 교통으로 정해진 경로없이 운행하는 택시 사이에 위치한 중간 형태의 대중교통으로 간주되었으며(Blake et al., 2004), 정해진 노선이 없이 노선이 유연하다는 장점을 바탕으로 지역교통에서 광역교통까지 광범위한 범위를 서비스하였다(Mageean and Nelson, 2003; Bellini et al., 2003). 또한, 연계수단으로써 도시 교외 지역에서 도심지의 철도 등 대량운송 네트워크까지 이동하는 수단으로 활용되어 대중교통 이용접근성을 향상시키는 역할을 했다(Papanikolaou et al., 2017). DRT 서비스의 이용 계층은 주로 농어촌이나 저밀도 지역에 살며 고령자, 장애인 등 이동에 제약이 있는 취약계층이었다. 운영 방식은 주 사용 대상자를 고려하여 전화 호출 방식을 사용하는데, 상담센터를 통해 운영되어 소요 비용이 높지만(Wang et al., 2013), 다른 복지교통 대비 비용 효율적인 것으로 알려져 있다(Papanikolaou et al., 2017).

DRT는 2000년대 들어 정보통신기술의 확산과 스마트폰 보급으로 차량과 승객의 위치를 실시간으로 확인하고 배차할 수 있게 되면서, 서비스 최적화와 운영 효율면에서 큰 개선이 있었다(Nelson and Phonphitakchai, 2012; McLeod et al., 2017). 최근에는 대량으로 발생하는 실시간 통행수요를 빠르게 연산하여 최적 운행경로를 즉각 제공하는 IT 기술이 발전하고, 차량 및 이용자의 위치를 알 수 있는 스마트폰이 확산되면서 DRT 서비스가 도시 대중교통의 새로운 가능성으로 대두되고 있다(Jokinen et al., 2011; 2019; Ryley et al., 2014; McLeod et al., 2017; Alonso-González et al., 2018; Perera et al., 2020; Berrada and Poulhès, 2021). 일정한 노선과 시간표 없이 이용자 수요에 따라 경로를 만들고 운행하는 DRT의 유연한 특성(Sanaullah et al., 2021)이 고정경로를 운행하는 대중교통의 약점을 보완하고, 이용자의 동적 수요에 즉각 반응할 수 있게 하므로 승용차의 편의를 대체할 수 있는 수단으로 인식되는 것이다(Mageean and Nelson, 2003; Jokinen et al., 2011; McLeod et al., 2017).

보다 최근에는 DRT를 중저밀 지역의 대중교통 대체재로 평가하고, 점진적으로 대중교통과의 통합서비스(Mobility as a Service, MaaS) 모델로 접근하려는 움직임이 등장하였다(Berrada, 2021). 그러나 DRT의 유연한 운행방식이 택시나 우버만큼 개인화된 형태는 아니므로, 이용자들은 퍼스트/라스트마일, 여객운송 네트워크를 연결하는 대중교통의 보완재로 바라보는 시각이 우세하며(Jokinen et al., 2011; McLeod et al., 2017; Alonso-González et al., 2018; Kaufman et al., 2021), 아직 대중교통과 유사한 서비스로 인식 하는 경향이 있다(Perera et al., 2020).

2. DRT의 다른 통행수단과의 차별성

DRT는 도시의 VMT(Vehicle-Miles-Traveled) 혹은 VHT(Vehicle-Hours-Traveled)가 감소하고 대중교통 이용을 활성화하는 데 도움을 주었다. 이전 연구(Stiglic et al., 2015)는 DRT가 대중교통이 없는 네트워크에서 VMT와 도로 혼잡을 효과적으로 줄인다고 보고한다. DRT는 대중교통이 잘 갖춰져 있는 도시에서도 자동차 사용을 줄이는 데 효과적이었다. 호주의 BRIDJ 서비스는 2018년 7월 시드니 이너웨스트(Inner west) 지역에 대중교통 거점을 잇는 퍼스트/라스트마일 수단으로 도입되었다. DRT 서비스가 도입된 이후 첨두시간대에 이너웨스트 통근자의 자가용 이용이 3.4% 감소하였으며, 대중교통은 4.6% 증가한 것으로 보고되었다(Perera et al., 2020).

한편 일부 연구는 DRT로 인해 VMT가 증가할 수 있다는 시뮬레이션 결과를 보고하지만(Fagnant and Kockelman, 2016), VHT 감소에 대해서는 대체로 의견이 일치한다. DRT 도입은 통행수요와 대중교통 보급률의 크기와 상관없이 시간이 지남에 따라 VHT 감소에 효과적이었다(Chen et al., 2019). 다만 통행수요가 많고 대중교통 보급률이 높은 도시는 복잡한 양상을 띠었는데, 도입 초기에는 한시적으로 VHT가 증가하지만 시간이 지남에 따라 DRT 이용률이 증가하면서 VHT가 줄어드는 것으로 나타났다.

DRT는 통행시간, 운행경로의 유연성과 차량당 수용 가능한 승객수에서 대중교통과 차별성을 보였다. 네덜란드 아르헬-네이메헌(Arnhem-Nijmegen)에서 시범 운영된 DRT 서비스에 따르면 DRT 통행의 50%가 대중교통 대비 통행시간이 절반으로 감소하였으며, 대중교통수단 접근성을 상당히 개선하는 것으로 보고한다(Alonso-González et al., 2018). 접근성 향상은 경로유연성과 관련이 깊다. 대중교통은 고정 노선과 시간표에 따라 운행되어 시시각각 변하는 통행수요에 대응하는 데 한계를 가지는(Redman et al., 2013; McLeod et al., 2017) 반면, DRT는 운행경로가 유연하다(Sanaullah et al., 2021). 경로유연성은 노선이 고정된 수단에 비해 보다 분산된 목적지를 가지는 데 유리하다. 이에 고정경로를 운행하는 대중교통의 약점을 보완하고, 이

용자의 동적 수요에 즉각 반응할 수 있게 하므로 승용차의 편의를 대체할 수 있는 수단으로 인식되고 있다(Mageean and Nelson, 2003; Jokinen et al., 2011; Sihvola et al., 2012; McLeod et al., 2017). 그러나 DRT는 유연한 운행경로에 따라 통행시간이 가변하므로 정시성을 요구하는 통근과 통학통행보다 여가, 쇼핑, 비정기적 진료와 같은 유연한 통행에 적합한 수단으로 인식된다(Potts et al., 2010).

DRT의 또 다른 장점은 경로선택이 유연한 승차 호출서비스의 특성을 가지는 동시에 대량운송이 가능하다는 점이다. 차량당 수용 가능한 승객수에서 DRT는 택시보다는 많지만 버스보다는 적은 승객을 태워 중간 층위의 역할을 하는 것으로 보았다(Papanikolaou et al., 2017). 대량운송이 가능한 DRT는 시뮬레이션을 통해 승용차 이용을 줄이고 대중교통 경쟁력을 향상시킬 수 있는 서비스로, 비용효율적이고, 운영탄력성이 있으며, 사회적 편익면에서 신뢰할 수 있을 만한 서비스로 평가받는다(Jokinen, 2011; Sihvola et al., 2012).

주로 저밀교외지역에서 취약계층을 위해 대중교통을 보조하고 연계하는 수단으로 사용되었던 DRT는 최근 들어 IT 기술의 발전과 스마트폰의 확산으로 도시에서 서비스되는 것이 가능하게 되었다. 도심 DRT는 승용차와 대중교통의 장점인 경로선택 유연성과 대량 운송을 동시에 가진다. 더불어 다른 통행수단 대비 통행 소요 시간이 감소하고, 대중교통의 한계인 고정된 노선을 극복하여 분산된 통행수요를 감당하는 것이 가능하다. 그러나 도심 DRT는 아직 초기 단계로서 누가, 언제, 어떤 목적으로 이용하는지 알려지지 않았고, 특히, 도시의 주요한 통행수단인 대중교통과 비교하여 어떤 차이를 보이는지 연구된 바가 없다. 이에 이 연구는 대중교통과의 차이를 중심으로 도심 DRT의 이용자 특성을 분석하였다.

III. 연구 방법

1. 연구 대상지

연구의 대상지인 세종특별자치시는 2012년 수도권 과밀해소와 국가균형발전을 목적으로 계획된 464.8km² 면적의 도시이다. 세종시는 균형있고 분산된 도시를 목표로 대중교통중심 개발(TOD)과 전통적인 근린 개발(TND) 모델을 따랐다(Kwon, 2015). 도시의 중앙에는 면적 3km²의 오픈스페이스가 배치되어 시민들이 웅장한 중앙공원과 하천과 연계된 녹지 네트워크를 공유할 수 있는 환경친화적인 도시를 지향한다(권영상, 2009). 세종시는 중앙의 녹지를 중심으로 길이 22.9km의 이중 환상형(Two-ring) 대중교통 축이 둘러싸는 TOD 도시로 계획되었다.

도시의 구조는 주요 기능이 도시 전체에 분산되는 분산형 구조가 채택되었다. 이중 환상형에 따라 6개의 자족기능을 가지는 생

활권과 약 20개의 근린 단위 구조로 구성되며, 근린 단위는 TND라고 불리는 전통적인 근린 단위의 전형적인 양식에 따라 건설되었다. 세종시 TOD와 TND의 핵심요소인 이중 환상형 구조는 도시 기능과 교통량을 분산하는 것이 주요 목표이다. 그러나 2018년 기준 당시 목표한 승용차 분담률 30%를 초과하고(44%), 대중교통 수단분담률은 10% 수준에 머물러(한국교통연구원, 2019), 당초 계획한 대중교통 체계의 한계를 드러냈다.

이러한 여건의 세종시에 ICT 기술과 접목한 도심 수요응답 교통 서비스가 스마트도시 규제샌드박스 실증특례를 받아 2021년 최초 도입되었다. 도심 교통수단으로 새롭게 등장한 DRT가 대중교통 중심도시로 계획된 세종시 교통체계에 어떠한 영향을 미치고 있는지 연구하였으며, 6개 생활권 중 초기 조성된 생활권이자 중앙행정 기능을 담당하는 1생활권을 대상으로 한다(Figure 1).

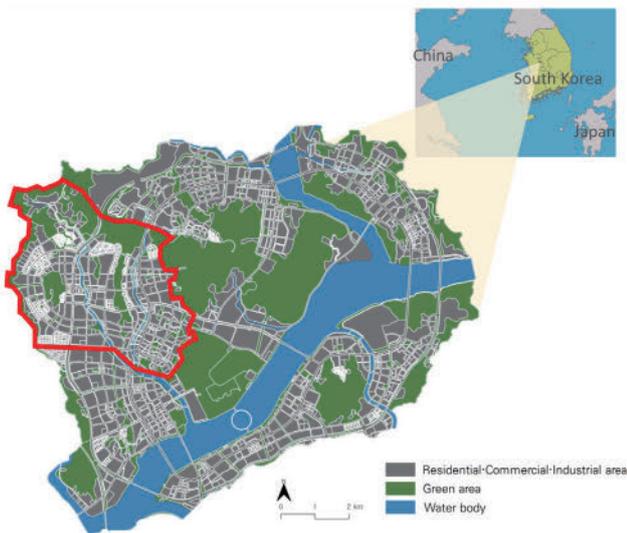


Figure 1. The location of Sejong City and study area (Red line)

2. 셔클서비스

셔클서비스는 2014년 4월부터 세종시 1생활권에서 운행되고 있는 도심 DRT 서비스로 DRT 운행방식 중 3단계에 해당하는 지역형(Area-wide) 서비스이다.¹⁾ 셔클서비스는 매일 오전 6시부터 자정까지 연중무휴로 운영되며, 서비스 차량은 미니버스와 유사한 크기의 11인승 대형 승합차량이다. 셔클서비스 정류장은 모든 노선버스 정류장을 활용할 수 있고, 미니버스 크기로 생활 도로 접근이 가능하며, 가상정류장으로 서비스 범위를 유연하게 조정할 수 있는 점에서 이용자의 대중교통 접근성을 높일 수 있다.

3. 데이터

1) 통행데이터

DRT 통행데이터는 세종시 270개 정류장에서 집계된 20,793건의 셔클서비스 통행기록이 사용되었다. 셔클서비스 정류장은 지역 어디서나 도보 5분(약 400m) 내에 이용이 가능하도록 위치해 대상 지역 전체를 커버한다(Figure 2). 통행기록은 2022년 5월 월요일부터 금요일까지 발생한 총 22일의 평일 통행을 대상으로 하였다. 주말 통행은 통행수요와 통행목적에서 평일과 큰 차이를 보이므로 분석 범위에서 제외하였다.

대중교통 통행시간 데이터는 구글 Directions API에서 추출하고, 이용자 수 데이터는 세종시 교통정보시스템의 빅데이터 분석 시스템에서 제공하는 정류장별 이용자 현황 데이터를 활용하였다. 구글 Directions API는 출발지와 목적지의 좌표를 기반으로 목적지에 도달하는 가장 빠른 시간을 사용하였다. 정류장 승하차 데이터는 노선별 정류장마다 발생한 승차정보가 시간대별로 제공되며, 셔클의 운행범위 내에서 노선이 완결되는 지선버스 79개

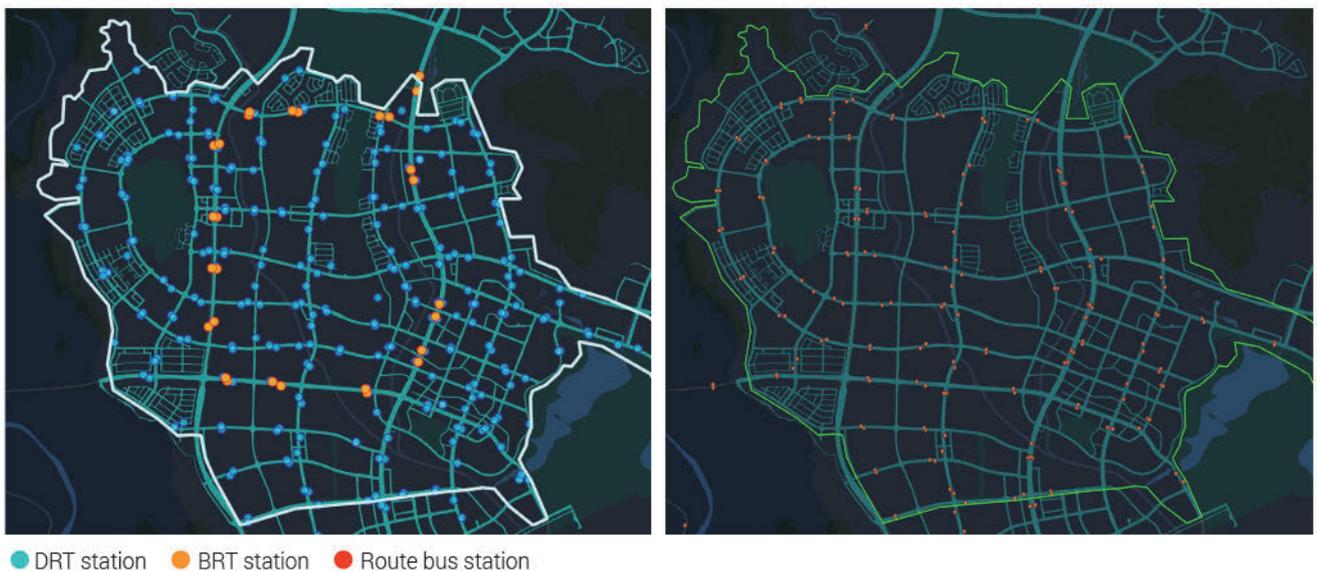


Figure 2. DRT, BRT, Route bus stations in study area

정류장과 BRT 28개 정류장에서 수집된 평일 승차 데이터를 셔클 데이터와 동일기간으로 추출하였다.

2) 분석 방법

이 연구는 DRT 이용 기록을 통해 수집된 이용자의 인구통계, 위치정보와 통행시간을 추출하여 DRT 이용자의 시간 및 공간특성을 분석하였다. 시간특성은 시간대별 통행수요(첨두 및 비첨두), 이용자(연령대 및 성별), 통행시간(도보, 대기, 재차시간)을 분석하였으며, 공간특성은 셔클 및 버스정류장의 이용자 수요분포, 통행패턴, 그리고 토지이용에 따른 통행맥락을 분석하였다. DRT 이용 기록은 이용자의 인구통계, 통행거리, 통행시간을 바탕으로 시간 및 공간적 통행패턴을 분석할 수 있으며, DRT 통행발생량에 대한 공간 특성과 통행수요가 집중된 첨두시간대(또는 요일) 통행맥락을 보다 구체적으로 분석함으로써 시공간적 측면에서 입체적인 접근이 가능하다(Liu et al., 2017; Haglund et al., 2019; Perera et al., 2020; Sanaullah et al., 2021).²⁾ DRT 통행의 시간 및 공간 특성은 한국 국토정보공사의 택지정보시스템에서 제공하는 세종시 토지이용 계획도의 토지이용분포를 바탕으로 대중교통 통행 특성과 비교될 것이다.

IV. 결과

1. 이용자 특성

세종시 DRT 서비스의 주 이용자는 40대(27%), 30대(26%), 20대(20%)와, 10대(17%) 순으로 비중이 높았다(Figure 3). 서비스 지역의 연령대별 인구 비중이 높은 30대(15.9%), 40대(22.5%)에서 DRT를 활발히 이용했는데, 인구 구성비가 9%에 불과한 20대의 DRT 서비스 이용률이 높게 나타난 것이 특징이다. 10대 미만 어린이 탑승객은 보호자와 함께 동행하는 것이 일반적이므로 셔클 이용 연령대로 드러나지 않았고, 60대 이상 고령인구는 서비스 이용률이 전체의 2%에 불과해 해당 연령대의 인구비율이 10.9%로 낮은 지역임을 감안하더라도 이용률이 매우 낮았다.

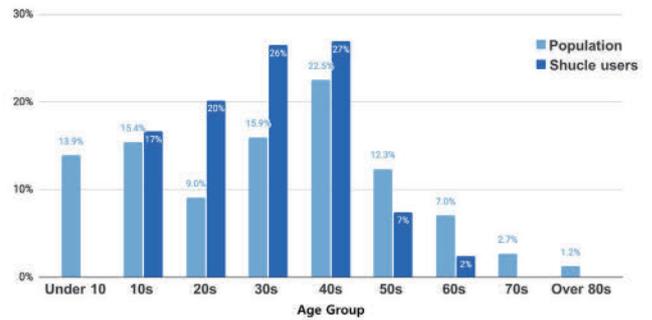


Figure 3. Population ratio and Shucle usage rate by age group

2. 통행빈도 및 통행시간

세종시 DRT의 통행수요는 오전 7시와 오후 4시가 첨두시간대로 나타났다(Figure 4a). 여성은 세종시 DRT 서비스 이용률의 70%를 차지하며, 첨두 및 비첨두시간대 모두 남성보다 높은 경향을 보였다. 특히, 비첨두시간(오전 9시에서 오후 3시)에는 여성의 DRT 이용 건수가 남성의 약 4배 이상으로 나타났다. <Figure 4b>는 시간대별 DRT 이용의 총 통행시간을 보여준다. DRT의 통행시간은 (1) 배차 후 탑승까지의 대기시간(Waiting time), (2) 승차 후 하차까지의 재차시간(In-Vehicle time), (3) 하차 후 목적지까지의 도보시간(Walking time)의 합으로, 한 달 동안 평균 19분(도보 4분, 대기 5.6분, 탑승 9.3분)이 소요되었다. 총 통행시간은 수요가 집중되는 시간대에 증가하는 경향을 보였다. 이는 해당 시간대의 높은 수요와 승차공유로 인한 우회 통행의 발생으로 대기시간과 통행시간이 증가하기 때문일 것이다.

3. 시공간분석

<Figure 5>는 첨두와 비첨두 시간대에 나타나는 DRT 승하차 분포를 나타낸다. 첨두시간대에 나타나는 승하차 위치 분석 결과, 오전 7시 출근, 등교 시간대에는 중고밀의 주거지 주변에서 승차하여 중고교와 정부청사에서 하차하는 수요가 높았다(Figure 5a). 세종시 도시계획은 주거지역 마다 중고교를 배치하여 도보 통하

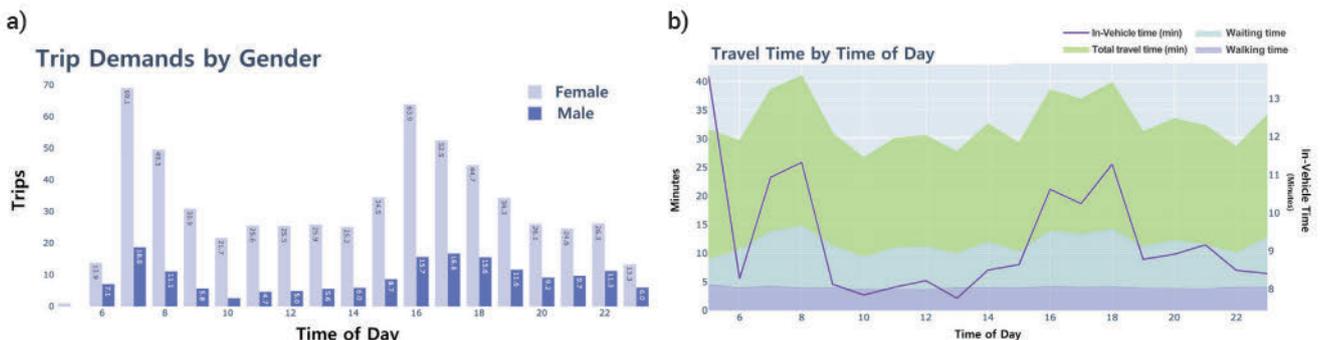


Figure 4. Trip demands and travel time of DRT. a) trip demands by gender, b) the distribution of walking, waiting, in-vehicle, and total travel time by time of day



Origin — Destination ● Pick-up ● Drop-off

Figure 5. The spatial distribution of on and off DRT during peak and off-peak travel hours. a) 7 AM peak hour, b) 4 PM peak hour, c) 6 PM peak hour, d) 11 AM off-peak hour, e) 3 PM off-peak hour. The ends of the parabola represent boarding and alighting points, with the darker side indicating alighting. Enlarge this image [http://tinyurl.com/2e7xtnd7]

을 유도하였으나, 분석 결과는 보행거리를 넘어선 예상치 못한 통행이 발생하고 있음을 보여준다. 계획을 벗어나 분산되는 경향을 보이는 통행은 대중교통 노선으로 대응하기는 어려우므로 DRT가 보다 매력적인 수단이 될 수 있다. 오후 4시 통행은 매우 산발적인 통행패턴이 나타나는데, 대체로 이동거리가 오전 첨두에 비해 짧았다. 지역 내부통행이 활발했으며, 호수공원에서 생활권 중심부로 향하는 통행이 두드러진다(Figure 5b). 퇴근 시간대인 오후 6시는 오후 4시에 비해 통행패턴이 단순하고(Figure 5c), 이동거리가 짧지만 통행시간이 길었다. 이는 퇴근 시간대 교통체증과 DRT 수요 증가로 인한 우회통행의 영향 때문일 것이다. 주로 정부청사 주변에서 중고밀 아파트 단지가 위치한 종촌동 방향으로 통행하며, 상업지역이 있는 중고밀 주거지역에서의 하차도 빈번한 편이다. 비첨두시간인 오전 11시 통행은 대중교통 이용이 불편한 지역에서 청사 인근 상업지역까지 긴 거리의 통행이 나타난다

(Figure 5d). 주로 상업지역을 향하고 있고, 공원 방향을 향한 통행도 보인다. 여가 및 쇼핑 목적의 통행으로 예상할 수 있다.

〈Figure 6〉은 DRT, BRT, 노선버스의 이용부하를 토지이용 정보와 결합하여 시각화한 결과이다. DRT 이용 빈도는 상업시설과 BRT 노선 2개가 지나는 정류장(a)이 승하차 모두 가장 많이 이용된 것으로 나타났다(Table 1). 다음으로 이용이 빈번한 승차 정류장은 서북쪽에 위치한 약 1,665 세대가 거주하는 고밀 아파트 단지이다(b). 이 지역은 앞서 첨두와 비첨두시간대 통행수요가 높은 주거지였다. 대체로 고밀 주거지와 일부 중학교 인근 정류장은 승차가 하차보다 많았고, 상업시설과 대학병원, BRT 정류장 주변은 하차가 더 많았다. 중학교 인근 정류장의 높은 승차빈도는 DRT가 통학용으로 이용되고 있음을 의미하며, 등교보다 도착시간 변동에 덜 민감한 하교에 자주 활용되었다고 유추할 수 있다. 이는 승차 공유는 우회통행이 발생하여 정시성에 영향을

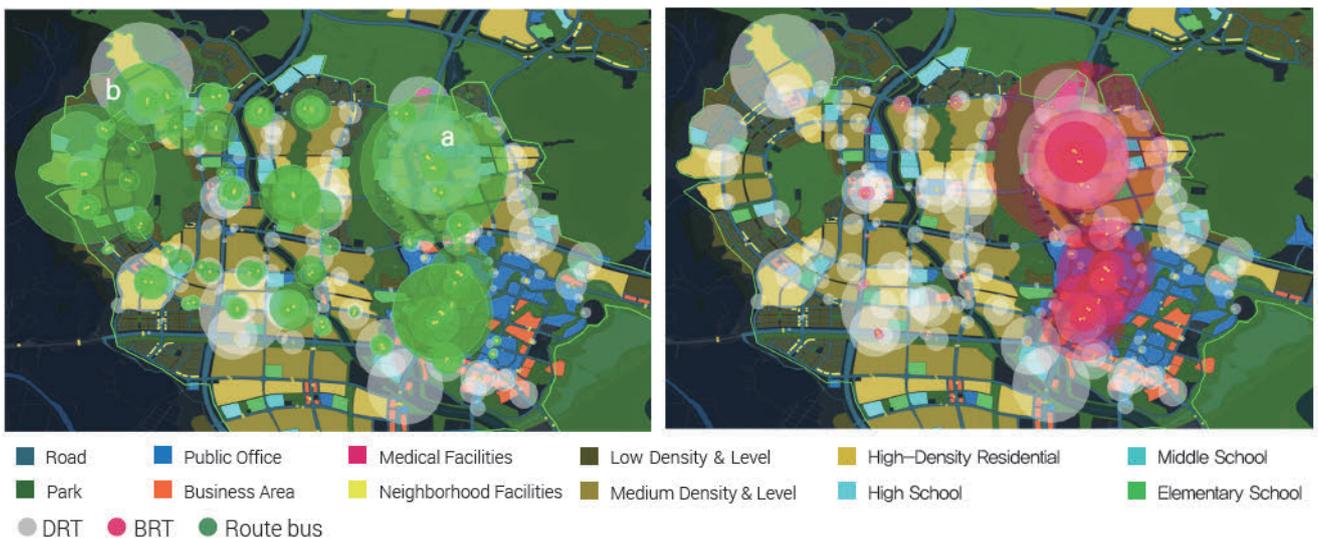


Figure 6. The spatial distribution of DRT, BRT, and Route bus users. DRT vs. Route bus (left), DRT vs. BRT (right). The size of the circle indicates the number of rides, and because there is a large difference for each means of transportation, the sizes are not compared equally.

Table 1. High-frequency riding stops and land use. Route buses are combined with stops of the same name across the street, but DRT is based on a single stop

Rank	DRT	# of Rides	Land Use	Route bus (201, 202)	# of Rides	Land Use	BRT (B0, B2, B5)	# of Rides	Land Use
1	도담동 도래마을(a) Dodam-dong (Doraem Village)	571	■	가락마을10,13단지 Garak Village Complex 10&13	11,495	■	도담동(a) Dodam-dong	34,998	■
2	CU힐스테이트고운점(b) CU Hill State Goun Branch	548	■	도담동 도래마을(a) Dodam-dong (Doraem Village)	6,765	■	정부세종청사북측 Government Complex (N)	22,153	■
3	메가커피 앞(a) Mega MGC Coffee	505	■	아름동커뮤니티센터 Areum-dong Community Center	5,111	■	정부세종청사남측 Government Complex (S)	18,633	■
4	가재마을1단지 상가 Gajae Village 1. Mall	429	■	정부세종청사북측 Government Complex (N)	4,676	■	세종충남대학교병원 Sejong Chungnam National University Hospital	3,506	■
5	시몬스(뱅크빌딩) Simmons (Bank Bldg.)	400	■	정부세종청사남측 Government Complex (S)	4,400	■	범지기마을 3,9단지 Beomjigi Village Complex 3&9	440	■
6	세종충남대학교병원 Sejong Chungnam National University Hospital	315	■	종촌초등학교(가재마을3단지) Jongchon Elementary School (Gajae Village Complex 3)	4,171	■	범지기마을 10단지북측 Beomjigi Village Complex 10 (N)	341	■
7	가락마을111동 상가 Garak Village 1. Mall	293	■	종촌초등학교 (가재마을1,2단지) Jongchon Elementary School (Gajae Village Complex 1&2)	3,236	■	고운뜰공원, 대법원등기정보센터 GounTtl Park	539	■
8	어진중학교 EoJin Middle School	270	■	종촌종합복지센터 Jongchon Community Center	2,672	■	다빛초등학교(가온마을) Dabit Elementary School (Gaon Village)	344	■
9	정부세종청사남측 Government Complex Sejong (South)	262	■	두루중학교 Duru Middle School	2,351	■	종촌초등학교(가재마을) Jongchon Elementary School (Gajae Village)	296	■
10	국민은행 세종중앙점 KB Bank Sejong Jungang	251	■	축산품질평가원 KAPE	2,309	■	아름제2중(가락마을) Aerum Middle School 2 (Garak Village)	231	■

받을 수 있어 시간에 민감한 통행에 적합하지 않다는 선행연구의 주장을 뒷받침한다. 제1생활권 외곽 서북쪽에 위치한 중고밀 주거지 주변은 노선버스 정류장까지의 거리가 멀고 대중교통 접근성이 떨어지는 편이다. 이에 보다 접근성에서 유리한 DRT가 꾸준히 이용된 것으로 보인다. DRT가 지역의 대중교통 접근성을 보완하는데 기여한 사례라고 할 수 있다.

4. DRT와 대중교통 통행특성 비교

DRT 서비스 이용기록과 비교가 가능한 구글 API의 대중교통 경로는 17,338건이 도출되었다. <Figure 7>은 DRT 서비스 이용기록과 구글 API의 대중교통 경로 분석 결과를 보여준다. 분석은 네 가지 이동 유형(총 통행시간, 재차시간, 도보시간, 대기시간)과 시간대별 소요시간을 대상으로 하였다. 분석 결과 DRT 통행

은 대중교통에 비해 총 통행시간(Trip Time)이 약 10분 정도 적게 소요되는 것으로 나타났다. 구체적으로 재차시간(In-Vehicle Time)은 대중교통에 비해 1.9분 더 걸렸지만, 도보시간(Walking Time)과 대기시간(Waiting Time)은 각각 5.33분, 7.11분이 적게 걸렸다. DRT의 재차시간이 대중교통에 비해 긴 이유는 세종시가 대중교통을 중심으로 교통시스템이 구축되어 있고, DRT는 승차공유로 인해 우회통행이 발생하기 때문이다. 재차시간의 차이는 수요가 많은 첨두시간에 상대적으로 더 두드러졌다.

시간대별 통행시간은 대중교통이 DRT에 비해 특정시간(5시, 23시)을 제외하면 변동성이 적었다. DRT는 대중교통에 비해 수요가 집중되는 첨두시간에 대기시간과 재차시간 변동성이 컸는데, 이는 DRT는 수요변화에 따라 적절한 차량공급이 이루어지지 못할 경우 서비스 품질이 불안정해질 수 있음을 시사한다. 그럼에도 불구하고 DRT는 네 가지 이동유형의 모든 시간대에서

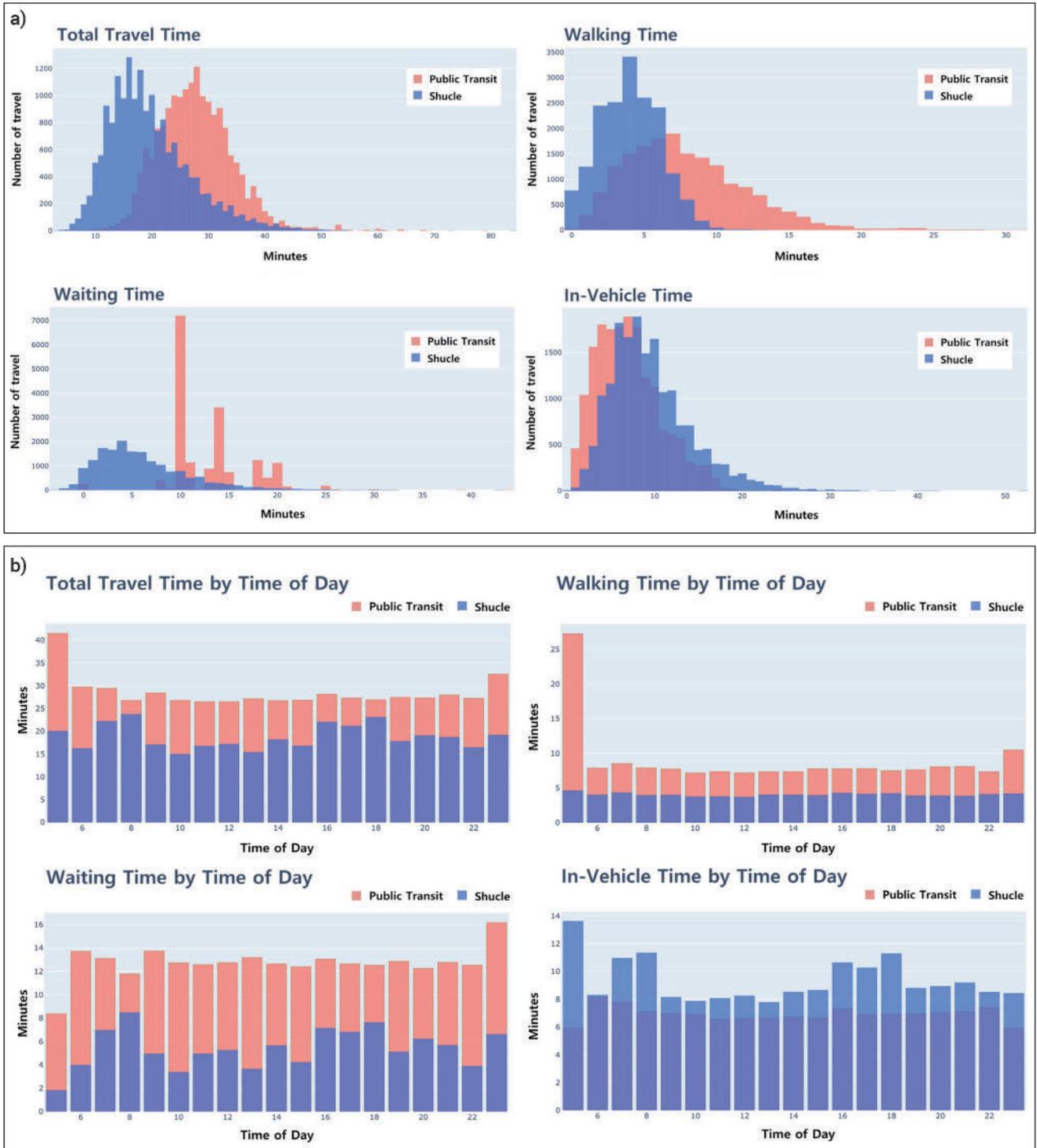


Figure 7. Comparison of travel time between DRT and public transport.

a) distribution of walking, waiting, in-vehicle and total travel time by mode; b) distribution by time of day

대중교통에 비해 통행에 소요되는 시간이 적게 나타났다는 점이 인상적이다.

세종시 DRT는 고정노선버스의 수요를 대체하고, BRT 수요를 연계하는 피더 역할을 하는 동시에 고정노선이 대응하기 어려운 지역의 수요에 대응하였다. DRT는 두 노선버스가 운행되는 버스정류장에서 노선버스와 비슷한 승하차 수요를 보였으며, 노

선버스 정류장이 없는 지역의 수요에 대응하는 수단이 되었다. 또한, DRT는 BRT 정류장과 승하차 빈도에서 높은 상관성을 보인다. BRT 정류장은 생활권 간 빠른 내부통행 및 광역이동의 거점이자 상업 및 업무 중심지역이기 때문에 BRT정류장을 기종점으로 시간과 경로가 유연한 DRT 통행수요가 높았으리라 예상할 수 있다. BRT 피더 측면에서 DRT는 두 노선버스가 도달하지 못

하는 곳의 수요에 대응함으로써 지역 전체의 BRT 접근성 제고에 기여했을 것이다. 이로써 지역민의 대중교통 접근성을 향상시키고, 유연한 일상통행을 가능하도록 도울 수 있다.

V. 토의 및 결론

DRT는 피더와 같은 대중교통 보조수단을 넘어 독립적인 교통 수단으로 활용될 수 있는 가능성을 보여 주었다. 기존연구는 DRT의 경로유연성이 대중교통 연계수단으로 활용되기에는 충분했지만 정시성이 중요한 통행에는 적합하지 않은 것으로 평가하였다(Potts et al., 2010; Wang et al., 2014; Sanoullah et al., 2021). 세종시의 DRT도 정시성이 민감한 통행, 예컨대 오전 첨두시간(7시)에는 총 통행시간이 대중교통과 크게 차이가 나지 않았다. 그러나 정시성이 엄격하게 요구되지 않는 귀가길 통근, 통학에는 활발히 이용되는 경향을 보였고, 대중교통에 비해 총 통행시간이 절약되었다. 또한, 〈Figure 5〉와 〈Figure 6〉에서 살펴본 승하차 지점 분포 패턴은 DRT가 고정 노선버스 정류장이 없는 지역으로 운행하여 외곽지역 거주자의 대중교통 접근성을 향상시켰으며, 비정기적으로 발생하는 다양한 목적의 통행에 활용되었음을 보여 주었다. BRT 정류장 승하차 빈도가 높음으로 보아 광역 노선의 피더 역할도 훌륭히 수행하였다고 평가할만하다.

DRT는 대중교통에 비해 통행에 소요되는 시간이 적었다. 이는 대중교통 대비 약 50% 가량 통행시간이 단축되었다는 네덜란드 연구의 결과(Alonso-González et al., 2018)를 지지한다. 세종시 DRT의 평균 통행시간은 19.0분으로 대중교통의 평균 통행시간 29.5분에 비해 약 35.6% 적게 소요되었다. 통행시간의 감소는 도보와 대기에 소요되는 시간에서 주로 나타났고, 이는 DRT가 대중교통에 비해 접근성이 매우 뛰어나다는 확실한 증거이다. 다만, DRT의 평균 재차시간은 대중교통에 비해 증가하였다. 이는 경로가 유연한 수요응답형 수단의 특징이 반영된 것으로 승차 공유에 따른 우회 통행의 발생에 기인한다. 통행수요에 따른 적절한 우회비용 도출이 필요한 대목이다.

DRT는 선행연구(e.g., Bellini et al., 2003)와 같이 다양한 목적지로의 짧고 빈번한 비의무통행 수요를 감당하는 데 적합하였다. 특히, 비첨두시간에 비정기적이고 산발적으로 발생한 수요에 훌륭히 대응하였다. 예컨대, 수요가 지속적으로 발생하지 않고 드물게 나타나는 공원 인접 정류장 승하차 빈도가 대중교통에 비해 높게 나타났다. 세종시는 환경친화적인 도시 조성을 목표로 도시 중앙에 시민들이 공유할 수 있는 웅장한 중앙공원과 녹지-하천 네트워크를 조성하였다. DRT는 비첨두시간인 오전 11시와 오후 3시에 드물게 운행하는 노선버스를 대신하여 공원 통행수요를 감당함으로써 도시계획적으로 분산된 도시 기능의 활용성을 증가시켰다.

DRT는 거주민의 대중교통 접근성 향상에 기여하였다고 평가할 수 있다. 대중교통 공급은 예상되는 이용자 수를 고려하여 정류장 간격과 운행 빈도가 결정되고, 적절한 통행 수요의 최소 문턱(threshold)이 요구된다(Stone et al., 2007; Gim, 2017). 따라서 수요가 충분치 못한 지역에서 노선버스의 정류장을 증설하거나 운행 빈도를 늘리는 것이 어려운 반면, DRT는 수요를 기반으로 모든 노선의 버스정류장과 가상정류장을 활용할 수 있으면서 모든 정류장에 정차할 필요 없이 수요에 따라 유연하게 운행할 수 있으므로 노선버스에 비해 효율적인 운행이 가능하다. 연구 결과 고정 노선버스 정류장이 없는 일부 지역에서 대중교통을 타기 위해 이동하는 수고로움을 완화하여, 대중교통에 비해 도보시간은 5.33분, 대기시간은 7.11분 더 적게 소요된 것으로 나타났다. 또한, 고밀 주거지역에서의 높은 DRT 이용 빈도(〈Figure 6〉과 〈Table 1〉의 b지점)는 고밀도 대도시에서 DRT의 활용 가능성이 충분하다는 것을 보여 주는 중요한 증거가 될 수 있다.

더불어 DRT는 대중교통 접근성이 낮은 주거지역의 근거리 통행을 보조하는 수단으로 활발히 이용되었다. 이는 날씨나 신체 조건에 의존하는 도보나 자전거와 같은 비동력수단과 더불어 자동차를 대체하는 통행수단으로써 높은 가치를 갖는다고 평가될 수 있다. 여성들의 높은 이용 빈도는 DRT가 상대적으로 교통약자에게 유용한 수단이 될 수 있음을 보여준다. 이는 DRT가 도시에서 저소득자, 노인, 소외계층과 같이 사회적 약자를 위한 교통형평성 향상에 기여하는 잠재력이 있음을 시사한다(Kaufman et al., 2021). 그러나 한편으로 거주인구의 약 11%인 60대 이상 인구의 DRT 이용 비율은 단지 2%에 불과한 것으로 나타났다. 이는 스마트폰 앱 활용과 같이 디지털 기술에 익숙하지 않은 고령층이 서비스에서 배제되고 있음을 의미한다. 이 결과는 다양한 신체적, 정신적으로 취약한 인구에 대한 추가연구의 필요성을 나타낸다.

DRT는 도시계획과 교통계획의 간극을 메우는 잠재성 있는 수단이 될 수 있다. DRT는 유연한 통행을 가능하게 하여 도시의 연결성을 증가시키고, 통행시간을 줄여 교통 효율성을 향상하였으며, 교통 형평성에 기여하고, 목적지 다양성을 확대하여 보다 효율적인 토지이용을 가능하게 하였다. 반면, 이 연구를 통해 통행수요가 집중되는 시간대의 우회통행으로 인한 통행시간 증가와 고령층의 낮은 이용률로 유추되는 서비스 접근성 제약의 한계가 드러났다.

이 연구는 도심 DRT 통행 패턴을 살펴본 사례 연구로서 규제 특례 지역에 제한적으로 적용되었다는 공간적 한계를 가진다. 따라서, 다양한 지역의 도입사례에 대한 후속연구를 통해 도심 DRT의 특성에 대한 외적타당성을 확보할 필요가 있다. 또한, 기술 분석과 함께 추론적 연구가 진행되지 못한 한계가 있으므로, DRT 도입에 따른 운영 비용의 변화, 통행 효율 등 학술적 논거가 제시되는 향후 연구로 논의를 이어감으로써 도심 DRT의 가

능성을 다양한 측면에서 살펴볼 필요가 있다.

몇 가지 한계가 있음에도 DRT는 앞으로 지속적인 기술 고도화와 누적된 통행 데이터 분석을 통해 침두/비침두, 평일/주말, 지역적 특성 등 동적으로 변화하는 시공간적 통행수요를 효과적으로 고려하고(Perera et al., 2020), 심야 노선서비스를 효율적으로 대체하는(Sanaullah et al., 2021) 등 보다 나은 서비스를 제공하는 도시의 새로운 교통체계로 자리잡을 수 있을 것이다.

주1. DRT는 경로와 정차지의 지정여부와 이탈범위에 따라 4단계 운영방식으로 분류할 수 있다(Bellini et al., 2003; Mageean and Nelson, 2003). 1단계는 노선서비스와 유사하게 운행경로와 정류장이 고정되어 있고, 이를 따라 운행한다. 단, 이용자 예약이 발생했을 때 운행하며 필요에 따라 운행 시간을 지정할 수도 있다. 2단계는 우회 가능한 고정경로로 운행하고, 이용자 수요에 따라 부분적인 우회가 발생하며, 지정정류장으로 운행범위가 제한되어 회랑 서비스(Corridor service)로 분류된다. 3단계는 지정정류장을 활용하되 경로 유연성이 전제되며, 기차역 환승과 같이 이용빈도가 높은 공공장소의 일정을 고려하여 다대소(Many-to-few) 모드로 운영될 수 있다. 또한, 단일 기종점으로 회차하는 지역형 서비스(Area-wide service)도 3단계에 포함되며, 자유로운 운행이 가능한 다대다(Many-to-many) 모드에 적합하다. 가장 유연한 운영체계인 4단계는 지정경로나 정류장 없이 불특정 지점에 정차하고 자유롭게 운행하므로, 문전 서비스(Door-to-door service)인 택시와 유사하다.

주2. DRT 서비스는 이용자가 차량을 호출하는 시각과 위치정보가 기록되므로 이용자의 설문응답에 의존하는 대중교통과는 달리 통행수요의 패턴과 특성을 수집하고 분석하는 것이 보다 용이하다(Liu et al., 2017; Haglund et al., 2019; Sanaullah et al., 2021).

인용문헌 References

- 권영상, 2009. “행정중심복합도시 도시개념국제공모에 나타난 ‘탈중심적 도시구조’에 관한 연구”, 『한국도시계획학회지 도시설계』, 10(1): 139-154.
- Kwon, Y., 2009, “‘Decentralized Urban Structure’ Reflected in the International Urban Ideas Competition for the New Multi-Functional Administrative City in Korea”, *Journal of the Urban Design Institute of Korea Urban Design*, 10(1): 139-154.
- 한국교통연구원, 2019. 『2018 국가교통통계 국내편』, 세종. The Korea Transport Institute, 2019. *National Transportation Statistics 2018*, Sejong.
- Alonso-González, M.J., Liu, T., Cats, O., Van Oort, N., and Hoogendoorn, S., 2018. “The Potential of Demand-Responsive Transport as a Complement to Public Transport: An Assessment Framework and an Empirical Evaluation”, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2672(8).
- Bellini, C., Dellepiane, G., and Quagliarini, C., 2003. “The Demand Responsive Transport Services: Italian Approach”, *WIT Transactions on the Built Environment*, 64.
- Berrada, J. and Poulhès, A., 2021. “Economic and Socioeconomic Assessment of Replacing Conventional Public Transit with Demand Responsive Transit Services in Low-To-Medium Density Areas”, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 150: 317-334.
- Brake, J., Nelson, J.D., and Wright, S., 2004. “Demand Responsive Transport: Towards the Emergence of a New Market Segment”, *Journal of Transport Geography*, 12(4): 323-337.
- Cervero, R. and Beutler, J., 1999. *Adaptive Transit: Enhancing Suburban Transit Services*, University of California.
- Chen, Z., Liu, X.C., and Wei, R., 2019. “Agent-based Approach to Analyzing the Effects of Dynamic Ridesharing in a Multimodal Network”, *Computers, Environment and Urban Systems*, 74: 126-135.
- Coutinho, F.M., van Oort, N., Christoforou, Z., Alonso-González, M.J., Cats, O., and Hoogendoorn, S., 2020. “Impacts of Replacing a Fixed Public Transport Line by a Demand Responsive Transport System: Case Study of a Rural Area in Amsterdam”, *Research in Transportation Economics*, 83: 100910.
- Currie, G. and Fournier, N., 2020. “Why Most DRT/Micro-Transits Fail-What the Survivors Tell Us about Progress”, *Research in Transportation Economics*, 83: 100895.
- Fagnant, D.J. and Kockelman, K.M., 2018. “Dynamic Ride-sharing and Fleet Sizing for a System of Shared Autonomous Vehicles in Austin, Texas”, *Transportation*, 45: 143-158.
- Gehrke, S.R., Felix, A., and Reardon, T.G., 2019. “Substitution of Ride-hailing Services for More Sustainable Travel Options in the Greater Boston Region”, *Transportation Research Record*, 2673(1): 438-446.
- Gim, T.H.T., 2017. “Investigating Travel Utility Elements in Association with Travel Time and Mode Choice: The Case of Seoul, South Korea”, *Transportation Planning and Technology*, 40(2): 1-20.
- Haglund, N., Mladenović, M.N., Kujala, R., Weckström, C., and Saramäki, J., 2019. “Where Did Kutsuplus Drive Us? Ex Post Evaluation of On-demand Micro-Transit Pilot in The Helsinki Capital Region”, *Research in Transportation Business & Management*, 32: 100390.
- Jokinen, J.P., Sihvola, T., and Mladenovic, M.N., 2019. “Policy Lessons from the Flexible Transport Service Pilot Kutsuplus in the Helsinki Capital Region”, *Transport Policy*, 76: 123-133.
- Jokinen, J.P., Sihvola, T., Hyttiä, E., and Sulonen, R., 2011. “Why urban mass demand responsive transport?”. Paper presented at the 2011 IEEE Forum on Integrated and Sustainable Transportation Systems, Vienna: Austria.
- Kaufman, B., Burke, M., and Leung, A., 2021. “Evaluating Demand Responsive Transit Services Using a Density-Based Trip Rate Metric”, *Journal of Transport and Land Use*, 14(1): 499-519.
- Kwon, Y., 2015. “Sejong Si (City): Are TOD and TND Models Effective in Planning Korea’s New Capital?”, *Cities*, 42: 242-257.
- Liu, T.L.K., 2017. *The Evaluation of the Pilot Breng Flex*, Breng Flex.

20. Mageean, J. and Nelson, J.D., 2003. "The Evaluation of Demand Responsive Transport Services in Europe", *Journal of Transport Geography*, 11(4): 255-270.
21. McLeod, S., Scheurer, J., and Curtis, C., 2017. "Urban Public Transport: Planning Principles and Emerging Practice", *Journal of Planning Literature*, 32(3): 223-239.
22. Nelson, J.D. and Phonphitakchai, T., 2012. "An Evaluation of the User Characteristics of an Open Access DRT Service", *Research in Transportation Economics*, 34(1): 54-65.
23. Papanikolaou, A., Basbas, S., Mintsis, G., and Taxiltaris, C., 2017. "A Methodological Framework for Assessing the Success of Demand Responsive Transport (DRT) Services", *Transportation Research Procedia*, 24: 393-400.
24. Perera, S., Ho, C., and Hensher, D., 2020. "Resurgence of Demand Responsive Transit Services - Insights from BRIDJ Trials in Inner West of Sydney, Australia", *Research in Transportation Economics*, 83: 100904.
25. Potts, J.F., Marshall, M.A., Crockett, E.C., and Washington, J., 2010. *A Guide for Planning and Operating Flexible Public Transportation Services*, Washington: Transportation Research Board.
26. Redman, L., Friman, M., Gärling, T., and Hartig, T., 2013. "Quality Attributes of Public Transport That Attract Car Users: A Research Review", *Transport policy*, 25(2): 119-127.
27. Ryley, T.J., Stanley, P.A., Enoch, M.P., Zanni, A.M., and Qudus, M.A., 2014. "Investigating the contribution of Demand Responsive Transport to a Sustainable Local Public Transport System", *Research in Transportation Economics*, 48: 364-372.
28. Sanaullah, I., Alsaleh, N., Djavadian, S., and Farooq, B., 2021. "Spatio-temporal Analysis of On-demand Transit: A Case Study of Belleville, Canada", *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 145: 284-301.
29. Schwieterman, J.P., 2019. "Uber Economics: Evaluating the Monetary and Travel Time Trade-offs of tRansportation Network Companies and Transit Service in Chicago, Illinois", *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 2673(4): 295-304.
30. Sihvola, T., Jokinen, J.P., and Sulonen, R., 2012. "User Needs for Urban Car Travel: Can Demand-responsive Transport Break Dependence on the Car?", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2277(1): 75-81.
31. Stiglic, M., Agatz, N., Savelsbergh, M., and Gradisar, M., 2015. "The Benefits of Meeting Points in Ride-sharing Systems", *Transportation Research Part B: Methodological*, 82: 36-53.
32. Stone Jr, B., Mednick, A.C., Holloway, T., and Spak, S.N., 2007. "Is Compact Growth Good for Air Quality?", *Journal of the American Planning Association*, 73(4): 404-418.
33. Wang, C., Qudus, M., Enoch, M., Ryley, T., and Davison, L., 2014. "Multilevel Modelling of Demand Responsive Transport (DRT) Trips in Greater Manchester based on Area-wide Socio-economic Data", *Transportation*, 41: 589-610.
34. Young, M. and Farber, S., 2019. "The Who, Why, and When of Uber and Other Ride-hailing Trips: An Examination of a Large Sample Household Travel Survey", *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 119: 383-392.

Date Received	2023-09-26
Reviewed(1 st)	2023-11-13
Date Revised	2024-02-13
Reviewed(2 nd)	2024-03-04
Date Accepted	2024-03-04
Final Received	2024-03-21