ARTICLE

OD(Origin-Destination) 흐름 기반 네트워크 중심성 분석을 통한 수요응답형 교통체계(DRT) 운영 전략 프레임워크 제안

김규리[1] · 배장원[2*]
[1]한국기술교육대학교 산업경영학과 석사과정, [2]한국기술교육대학교 산업경영학과 부교수

A Framework for Demand Responsive Transport (DRT) Operational Strategy Based on OD Flow-Based Network Centrality Analysis

KIM, Gyu Ri[1] · BAE, Jang Won[2*]

[1]Master's Course, Department of Industrial Management, Korea University of Techonology and Education, Cheonan 31253, Korea
[2]Associate Professor, Department of Industrial Management, Korea University of Technology and Education, Cheonan 31253, Korea

*Corresponding author: jangwon_bae@koreatech.ac.kr

Abstract

This study proposes an operational strategy for Demand Responsive Transport (DRT) using Origin-Destination (OD) flow-based network centrality analysis to overcome the limitations of fixed-route public transport. By integrating smart card data with physical road networks, an OD-weighted network was constructed. Four centrality metrics—Degree, Closeness, Betweenness, and Eigenvector—were calculated and mapped to key operational elements of the DRT system. An empirical analysis conducted in Gangnam-gu, Seoul, identified optimal locations for vehicle relocation hubs and service boundary adjustments based on the topological characteristics of each centrality index. Unlike previous studies focused solely on physical infrastructure, this research incorporates actual transport demand flows into the network analysis, enhancing the practicality of the results. The findings are expected to serve as a foundational guideline for data-driven smart mobility design and the implementation of Mobility as a Service (MaaS) frameworks.

Keywords: Demand Responsive Transport (DRT), network centrality, OD flow, public transport operation, smart mobility

초록

본 연구는 기존 고정 노선 기반 대중교통의 경직성을 극복하고 효율적인 수요응답형 교통(DRT) 운영 전략을 수립하기 위해, 기종점(Origin-Destination, OD) 흐름 기반의 네트워크 중심성 분석을 활용한 운영 의사결정 프레임워크를 제안한다. 실제 버스정류장 승하차 데이터와 물리적 도로망을 결합하여 OD 가중치 기반 네트워크를 구축하였으며, 연결(Degree), 근접(Closeness), 매개(Betweenness), 고유벡터(Eigenvector) 중심성 지표를 산출하였다. 서울특별시

J. Korean Soc. Transp.
Vol.44, No.4, pp.666-682, August 2026
https://doi.org/10.7470/jkst.2026.44.4.666

pISSN : 1229-1366
eISSN : 2234-4217

ARTICLE HISTORY
Received: 31 March 2026
Revised: 24 April 2026
Accepted: 12 May 2026

Copyright © 2026
Korean Society of Transportation

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

강남구를 대상으로 한 실증 분석 결과, 각 중심성 지표의 위상적 특성에 따라 차량 재배치 거점 및 탄력적 서비스 권역 설정 등 구체적인 운영 가이드라인을 도출하였다. 본 연구는 물리적 도로 구조에 국한되었던 기존 분석의 한계를 넘어 실제 통행 수요의 흐름을 분석에 반영함으로써, DRT 운영 전략 수립을 위한 구조적 의사결정 기준을 제시한다는 점에서 의의를 가진다. 향후 본 연구는 데이터 기반 스마트 모빌리티 설계 및 MaaS(Mobility as a Service) 체계 구축을 위한 실무적 기초 자료로 활용될 것으로 기대된다.

주요어: 수요응답형 교통(DRT), 네트워크 중심성, 기종점(OD) 흐름, 대중교통 운영, 스마트 모빌리티

서론

대중교통은 현대 사회의 필수적인 사회경제적 활동을 지원하는 중추적인 국가 기반 시설이다(Park et al., 2022). 이는 이용자의 이동 편의성을 보장함과 동시에 교통 혼잡 완화, 에너지 절감 및 탄소 배출 저감 등 유기적인 사회적 편익을 창출한다(Litman, 2025; Park et al., 2019). 특히 고밀도 개발 지역 및 주요 상업 지구에서는 대중교통 운영 효율성이 도시의 지속 가능성과 경쟁력을 결정짓는 핵심 요인이다(Do, 2014).

그러나 대중교통 서비스의 효용은 공간적으로 균등하게 분배되지 못하고 있다. 대중교통 인프라의 구축과 유지에는 막대한 자본이 투입되므로, 수요가 낮은 외곽 지역이나 특정 지점에는 충분한 공급이 이루어지지 않는 서비스 사각지대가 발생한다. 이를 보완하기 위한 환승 체계 역시 환승 저항에 따른 이용 불편과 서비스 제공 가능 지역의 한계로 인해 근본적인 해결책이 되지 못하고 있다(Seo and Kim, 2024).

이러한 고정 노선 기반 대중교통의 경직성을 극복하고 다양한 이동 수요를 탄력적으로 충족하기 위해, 지역별 통행 특성을 반영한 유연한 수요 친화적 교통 체계의 필요성이 대두되고 있다(Lim and Hong, 2024). 이에 따라 정해진 노선과 배차 계획 없이 승객의 수요에 대응하여 실시간으로 운행 경로를 최적화하는 수요응답형 교통(Demand Responsive Transport, DRT)이 대중교통의 한계를 보완할 대안으로 주목받고 있다(Hong et al., 2024; Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2025).

효과적인 DRT 운영 체계를 구축하기 위해서는 단순히 수요가 발생하는 지점을 식별하는 것을 넘어, 지역 내 통행 수요가 복잡하게 얽히는 네트워크의 구조적 특성을 이해하는 과정이 선행되어야 한다(Jeong and Yoon, 2019). 기존의 DRT 입지 선정이나 서비스 구역 설계에 관한 연구들은 주로 인구 밀도나 지점별 수요 총량과 같은 정적(Static) 지표에 의존해 온 측면이 있다. 그러나 실시간으로 변화하는 기종점 간의 연결성을 바탕으로 운행되는 DRT의 특성상, 개별 노드가 전체 교통 네트워크 내에서 가지는 위상적(Topological) 가치를 정량적으로 파악하는 것이 필수적이다. 특히, 특정 지점이 단순히 수요가 집중되는 곳인지, 혹은 서로 다른 수요 거점들을 매개하는 전략적 요충지인지를 판별하는 것은 한정된 DRT 차량 자원을 최적 배분하고 운영 효율성을 극대화하기 위한 핵심적인 분석 근거가 된다.

이를 위해 본 연구는 효율적인 DRT 운영 전략 수립을 위한 OD 흐름 기반 도로 네트워크 중심성 분석 기반의 의사결정 프레임워크를 제안한다. 실제 버스 이용 데이터와 물리적 도로망을 결합하여 OD 가중치 기반 네트워크를 구성하였으며, 이를 바탕으로 연결(Degree), 근접(Closeness), 매개(Betweenness), 고유벡터(Eigenvector) 중심성을 도출하고, 이를 DRT 운영 체계의 핵심 구성 요소와 매핑(Mapping)하였다. 이는 물리적 도로망 구조 분석에 국한되었던 기존 연구들과 달리, 실제 통행 수요의 흐름을 네트워크 분석에 직접 반영함으로써 분석의 실효성을 높였다는 점에서 차별성을 가진다.

서울특별시 강남구를 대상으로 한 실증 분석 결과, 각 중심성 지표가 높은 지역을 식별하고, 이를 바탕으로 차량 재배치 거점 및 서비스 권역 설정 등 구체적인 운영 가이드라인을 도출하였다. 본 연구는 DRT 운영 전략 수립을 위한 구조적 의사결정 프레임워크를 제안하고, 이를 기반으로 실무 적용이 가능한 가이드라인을 제시하였다는 점에서 학술적 기여를 가진다. 또한 공급자 중심의 효율성 분석을 넘어 이용자의 이동 편의성과 접근성을 정량적으로 반영했다는 점에서 의의가 있으며, 향후 데이터 기반 스마트 모빌리티 설계 및 MaaS(Mobility as a Service) 체계 구축을 위한 실무적 기초 자료로 활용될 것으로 기대된다.

배경 지식 및 관련 연구

본 장에서는 수요응답형 교통체계(Demand Responsive Transport, 이하 DRT)에 대한 개념과 MaaS(Mobility as a Service) 환경에서 운영되는 DRT 운행 프로세스를 설명한다. 또한, DRT와 네트워크 중심성을 결합하여 논의한 기존 연구들을 검토하고, 본 연구와의 차별성을 비교·분석한다.

1. 수요응답형 교통(DRT)

DRT는 고정된 노선 대신 승객의 실시간 수요에 따라 운행 구간과 정류장을 탄력적으로 운용하는 대중교통 서비스이다(Kim et al., 2023). 본 서비스는 인구 감소와 고령화가 가속화되는 지역 내 이동권을 보장하고, 고령층의 의료·문화·복지 접근성을 개선 및 교통 사각지대 해소를 위해 도입되었다(Korea Transportation Safety Authority, 2025). Kim et al.(2024)는 DRT 도입 후 대중교통 평균 통행시간이 약 35% 제고되었으며, 특히 저밀도·비고령 지역과 버스정류장 밀도가 높은 지역에서 성과가 극대화됨을 실증하였다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2025). 나아가 DRT는 기존 대중교통의 부재나 낮은 인구 밀도로 인한 비효율성 문제를 개선하는 동시에, 기존 대중교통 네트워크를 보완하는 수단으로 활용된다(Dauer et al., 2024).

최근 광역 지자체 간 경계를 초월하여 단일 생활권을 형성하는 '메가시티(Megacity)' 전략이 대두됨에 따라, 지역 간 상호연계성을 극대화하기 위한 교통 시스템의 일원화가 핵심 과제로 부상하고 있다. 이러한 맥락에서 MaaS(Mobility as a Service)는 개별적으로 운영되던 버스, 도시철도, 택시 및 공유 모빌리티 등을 단일 플랫폼으로 통합하여 최적 경로 탐색부터 예약, 결제까지 일괄적으로 제공하는 체계로서 주목받고 있다(Hwang, 2022). 이러한 MaaS 환경에서 DRT는 단순한 이동 수단의 개념을 넘어, 주요 교통 허브를 잇는 '퍼스트/라스트 마일(First/Last-Mile)' 기능을 수행함으로써 타 교통수단과의 유기적 연계를 도모하고 대중교통 활성화에 기여한다(Kim, 2024).

2. 관련 연구

수요응답형 교통에 대한 중요성에 비례하여 이를 실제 시스템에 통합하기 위한 연구들도 국내외에서 상당수 진행되었다. Narayan et al.(2019)은 기존 고정 노선형 교통과 수요응답형 교통을 단일 여정 내에서 조합할 수 있는 통합 경로 선택 및 배정 모형(Integrated route choice and assignment model)을 제안하였다. 네덜란드 암스테르담을 대상으로 한 에이전트 기반 시뮬레이션(ABM) 분석 결과, 수요응답형 서비스(Flexible PT)는 단독 수단으로 이용되기보다 주로 전체 여행 거리의 30% 미만을 담당하는 퍼스트/라스트 마일(Access/Egress) 수단으로 대중교통과 결합하여 이용될 때 그 비중이 높게 나타났다. 그러나 해당 연구는 DRT 도입을 위한 체계적인 가이드라인을 제시하는 데 한계가 있다. 반면, 본 연구는 네트워크 중심성 분석을 통해 도시 내 교통 흐름의 구조적 중요도를 식별하고, 이를 기반으로 DRT 운영 가이드라인을 제안한다.

Calabrò et al.(2022)는 에이전트 기반 모델로 고정노선형과 수요응답형 교통 서비스를 비교·평가하였다. 연구 결과, 수요가 낮고 역세권에 집중된 지역이나 역간 간격이 큰 지역에서는 수요응답형이 상대적으로 효율적이지만, 수요가 높고 분산된 첨두시간대에는 고정노선형이 더 높은 효율성을 보였다. 그러나 이러한 접근은 실제 교통 수요 데이터를 충분히 반영하지 못하고 다수의 가정에 의존하여 다른 지역에 일반화하기 어렵다. 이에 본 연구에서는 실데이터와의 연계성을 높여 일반화가 가능한 DRT 운행 분석 방법을 제시한다.

Choi et al.(2022)는 도농복합도시의 사례로 남양주시의 교통·공간 데이터를 활용하여 Hierarchical Clustering을 통해 DRT 유형을 분류하고, K-Means 및 DBSCAN Clustering을 적용하여 시간대별 승하차 패턴과 공간 밀집 특성을 분석하였다. DRT 도입이 적합한 구간을 6개의 클러스터로 분류하고, 이를 첨두형, 노선확충형, 노선대체형, 미도입형으로 구분하여 지역 맞춤형 DRT 유형을 제안하였다. 그러나 이러한 접근은 정류장 간의 상호연결성이나

네트워크 구조적 관계를 고려하지 못하기 때문에, 구체적인 교통 행태의 흐름이나 중심 허브의 역할을 설명하기 어렵다. 이에 본 연구에서는 네트워크 중심성 분석을 활용하여 지역 간 이동 패턴의 핵심 허브를 규명하고, 기존 DRT 운행 방식과 연계하여 지역 특성 맞춤형 DRT 운행 가이드라인을 제안하였다.

Seo and Kim(2024)는 지역별·시간대별 통행 수요의 특성에 따라 고정형 운행과 수요응답형 운행(DRT) 방식 중 어떤 것이 적합한지를 체계적으로 판단하는 방법론을 제안하였다. 통행 데이터의 공간·시간·사회경제적 특성을 Gower 거리로 통합해 DBSCAN 클러스터링을 수행함으로써, 지역·시간대별 통행 패턴을 그룹화하고 그에 따라 적합한 대중교통 운행 방식을 도출하였다. 그러나 실제 교통 네트워크의 구조적 연결성이나 OD 간 상호작용 특성은 충분히 반영하지 못한 한계점이 있다. 본 연구에서는 공공 데이터에서 OD 데이터를 구축하고 이를 활용하여 도시 내 OD 간 상호작용과 수요 분포를 통합적으로 고려하였다.

Scheurer and Porta(2006)는 호주 멜버른 북동부의 철도·트램·버스 노선을 대상으로, 환승지점과 노선을 기반으로 한 중심성·연결성 지표(centrality & connectivity metrics)를 계산하여 계획망의 네트워크 효율성과 접근성 변화를 정량적으로 비교·평가하였다. 그러나 이러한 다양한 교통 네트워크 구조의 효율성 평가는 이용자 수요의 시·공간적 변동성과 실제 이동 패턴을 충분히 반영하지 못한다는 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 OD 데이터 기반의 네트워크 중심성 분석을 통해, 도시 내 교통 흐름의 구조적 중요도와 지역별 이동 수요의 분포를 고려하였다.

Jayasinghe and Munshi(2014)는 기존 수요 예측 모델의 비용·데이터 한계를 극복하기 위해 네트워크 중심성 지표를 활용하여 인도 Ahmedabad의 정류장별 대중교통 수요를 분석하였다. 그러나 도로 네트워크의 위상적 구조와 정류장 위치 관계에만 초점을 두었으며, 실제 이용자의 이동 패턴이나 OD 수요 흐름을 충분히 반영하지 못했다는 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 승객의 출발지-도착지 데이터를 활용하여 수요의 방향성과 집중 구간을 반영한 네트워크를 구성하고, Degree, Closeness, Betweenness, Eigenvector 중심성 지표를 통해 수요 중심 허브 및 취약 구간을 식별하였다.

OD 흐름 기반 도로 네트워크 중심성 분석을 통한 DRT 운영 전략 프레임워크 제안

본 연구는 효율적인 DRT 운영을 위해 기존 도로 네트워크에 승객의 기종점(Origin-Destination, OD) 흐름을 결합한 새로운 네트워크 모델인 OD 흐름 기반 도로 네트워크를 구축하고, 이에 대한 사회연결망분석(Social Network Analysis, 이하 SNA) 기반의 중심성 분석을 활용하여 DRT 운영 전략 수립을 위한 의사결정 프레임워크를 제안한다. 또한 제안된 프레임워크를 바탕으로 DRT 핵심 구성요소별 운행 가이드라인을 도출한다. 연구의 전체적인 절차는 Figure 1에 상세히 기술하였다.

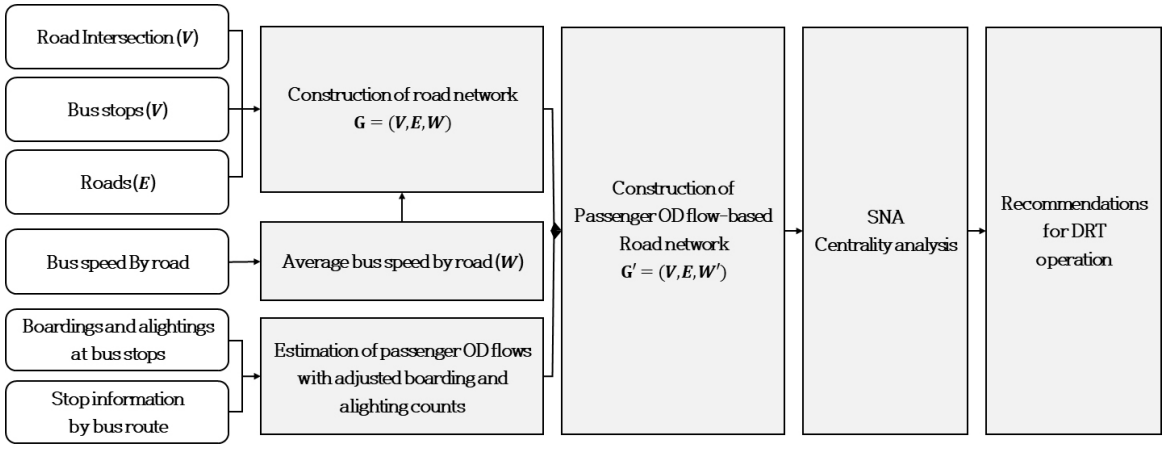


Figure 1. Methodology for suggesting DRT operations via sna-based centrality analysis on OD networks

OD 흐름 기반 도로 네트워크를 구축하는 과정은 다음과 같다. 우선 도로 교차점과 정류장을 노드(V), 이들을 연결하는 도로 구간을 링크(E)로 정의하여 도로 네트워크($G=(V,E,W)$)를 구성한다. 이때 정류장 노드는 실제 위치가 도로 중심이 아닌 보도나 인접 구역에 위치하는 특성을 고려하여, 네트워크와의 물리적 연결성을 확보하기 위한 정류장 진입 교차점을 추가로 생성하였다. 각 링크에는 버스 속도 데이터를 활용해 산출한 평균 속도를 가중치(W)로 부여함으로써 실제 도로 상황을 반영하였다. 이어 실데이터 기반의 버스정류장 승·하차 인원과 버스노선별 정류장 정보 데이터를 활용하여 정류장 간 승객 이동량(W')을 추정하였으며, 이를 기존 네트워크 가중치에 통합하여 OD 흐름 기반 도로 네트워크 ($G'=(V,E,W')$)를 최종적으로 구축하였다.

구축된 네트워크를 대상으로 SNA의 주요 지표인 연결(Degree), 근접(Closeness), 매개(Betweenness), 고유벡터(Eigenvector) 중심성 분석을 수행하여 핵심 정류장, 교통 허브 및 주요 연결 도로 구간을 식별하였다. 최종적으로 분석된 중심성 특성과 DRT 운영 모델을 매칭하여, 해당 지역의 도로망 구조와 실제 이동 수요에 최적화된 운영 방식을 제안한다. 본 연구에서 제안한 방법은 서울시 강남구를 대상으로 한 사례 연구 결과로 제시한다.

승객 OD 흐름 기반 도로 네트워크 구축

1. 도로 네트워크 구축

도로 네트워크($G=(V,E,W)$)를 구축하기 위해 도로 교차점과 정류장, 도로 데이터를 Table 1과 같이 활용하였다.

Table 1. Road network dataset

Dataset	Columns	Source	Size	Purpose
Road	Road Start intersection End intersection Road name Road length	Seoul Transport Big Data Platform, 2024 Seoul standard link information	25611 rows x 26	Construction of road network edges
Road intersection	Intersection Node name Latitude Longitude	Seoul Transport Big Data Platform, 2024 Seoul node information	10177 rows x 4	Construction of road network nodes
Bus stop	Stop ID Stop name Latitude Longitude Administrative district	Seoul Open Data Plaza, 2024 Seoul bus stop master information	12822 rows x 5	Generation of bus stop nodes and stop-entry intersections in the road network
Bus speed by road	Timestamp Link ID Link length Lane speed	Seoul Transport Big Data Platform, January 2025 intersection-based bus speeds	3220824 rows x 4	OD network based on shortest-travel-time paths

본 연구에서 도로 네트워크의 최소 단위인 도로는 시작 교차점부터 종료 교차점까지 연결된 개별 링크를 의미한다. 제공된 도로 데이터는 링크 단위의 네트워크 구조를 갖추고 있으나, 각 링크의 시작 및 종료 교차점에 대한 위·경도 좌표 정보를 직접 포함하지 않는 한계가 있다. 이를 해결하기 위해 별도의 도로 교차점 데이터를 활용하여 각 도로 링크의 시작 및 종료 교차점 노드를 매칭하였으며, 이를 통해 개별 노드의 실제 공간적 위치(위·경도) 정보를 확보하였다.

정류장 노드는 정류장 데이터의 위·경도 좌표를 기반으로 생성하였다. 특히, 공간적 분석의 정밀도를 높이기 위해 카카오맵 API를 활용하여 각 정류장이 속한 행정구 정보를 추출하고 속성 데이터로 결합하였다. 이후 정류장 노드

의 위·경도 좌표로부터 가장 인접한 도로를 탐색한 뒤, 해당 도로 선분에 정류장 노드 좌표를 직교 투영함으로써 실제 도로망과 연결되는 정류장 진입 교차점을 생성하였다. 최근접 도로 탐색 과정에서는 KDTree 기법을 활용하였다(Friedman et al., 1977). Figure 2와 같이 모든 도로의 중심 좌표를 트리 구조로 저장하고, 정류장별로 전체 도로 데이터를 비교하지 않고도 인접 후보군만을 선별하여 탐색하였다.

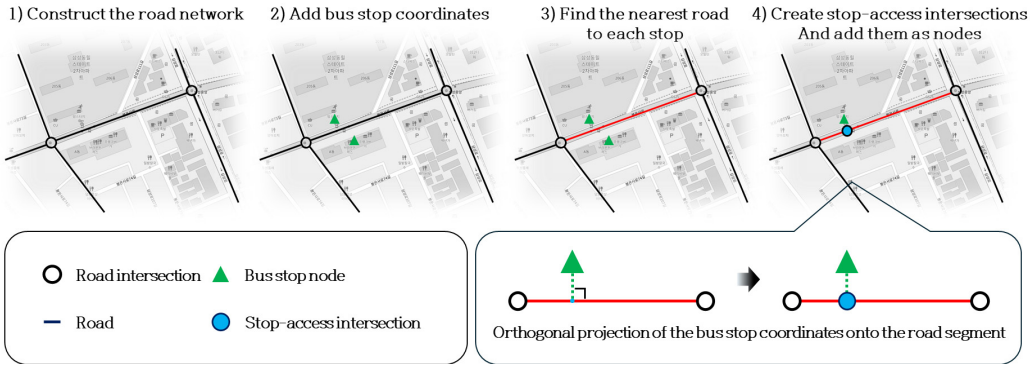


Figure 2. Process of creating bus stop entry intersections

이 과정에서, 기존에서 교차점 v_1과 교차점 v_2를 연결하던 단일 도로 $e = (v_1, v_2)$는 새로운 정류장 진입 교차점 v'이 생성됨에 따라 두 개의 세분화된 도로 구간 $e_1 = (v_1, v')$과 $e_2 = (v', v_2)$로 분할된다. 즉, 원래의 도로 구간 e는 $e = e_1 + e_2$와 같이 정류장 접근성을 고려한 세분화 구조로 재구성된다. 마지막으로, 각 링크에 대해 Table 1의 도로별 버스 속도 데이터를 기반으로 산출한 평균 이동 속도를 가중치로 부여하여, 이동시간이 반영된 도로 네트워크($G = (V, E, W)$)를 구축하였다.

2. 버스 승·하차 인원 보정을 통한 승객 OD 흐름 추정

대중교통 이용객의 세부적인 이동 패턴을 나타내는 OD 흐름 데이터는 개인정보 보호 및 데이터 보안상의 사유로 일반에 공개되지 않는 경우가 많다. 따라서 본 연구에서는 공공데이터로 제공되는 버스 정류장별 승·하차 인원 데이터와 버스 노선별 정류장 정보를 결합하여 실제 승객의 이동 흐름을 추정하는 방법론을 제시한다. 특히, 단순 평균치 기반의 추정을 넘어 대규모의 승하차 데이터를 정밀하고 효율적으로 처리하기 위해 Navick and Furth(1994)의 재귀적 추정(Recursive Estimation) 원리를 본 연구의 목적에 맞게 수정 및 보완하여 적용하였다. 이 방식은 노선별 승차 인원이 각 목적지 정류장에서 하차할 확률을 반복적으로 갱신함으로써, 실제 교통망 내에서 발생하는 동적인 승객 흐름을 보다 정교하게 반영할 수 있어 대규모 승하차 데이터를 활용한 OD 추정 분야에서 널리 활용되는 방법론이다(Navick and Furth, 1994; Ji et al., 2015). 본 연구에서 추정된 OD 흐름은 실제 관측 데이터의 제약으로 인해 간접적으로 산출된 값으로, 도시 내 이동 수요의 공간적 분포를 반영하는 지표로 활용된다.

1) 활용 데이터

승객 OD 흐름을 추정하기 위해 서울 열린데이터 광장에서 제공하는 버스정류장 승·하차 인원 데이터와 버스노선별 정류장 정보를 Table 2와 같이 활용하였다. 버스정류장 승·하차 인원 데이터는 버스 정류장 기준으로 버스노선별로 승·하차한 승객 인원 수를 파악할 수 있다. 이때 실제 운행이 이루어지지 않는 심야 시간대(02~03시) 자료를 제외하였으며, 승차 이전에 하차가 발생한 비합리적 데이터(예: 첫 정류장 하차 등)는 0으로 보정하였다. 한편, 버스노선별 정류장 데이터는 버스노선별 정류장 순번과 위·경도 좌표를 알 수 있는 데이터이다. 이때 순번은 특정 버스노선에 포함된 정류장을 통과하는 순서로, 이를 통해 각 노선의 이동 경로와 정류장 방문 순서를 확인할 수 있다.

Table 2. Passenger origin-destination dataset

Dataset	Columns	Source	Size	Purpose
Boarding and alighting counts at bus stops	Route number Route name Standard bus stop ID Bus stop name Hourly boardings (00:00–23:00) Hourly alightings (00:00–23:00)	Seoul Open Data Plaza; boarding and alighting counts by bus route and stop, December 2023	41674 rows × 52	Passenger OD estimation
Bus stops by route	Route ID Route name Stop sequence number Bus stop ID Longitude Latitude	Seoul Open Data Plaza; Seoul bus route information, January–April 2024	163856 rows × 7	Identification of stop sequences and paths for each bus route

Table 3은 정류장 순번별 버스 승하차 인원 보정을 통한 승객 OD 흐름 추정을 설명한다. 버스정류장 승·하차 인원과 버스노선별 정류장 정보를 활용하여 승객 OD 흐름을 재귀적으로 추정하는 과정을 설명하며, 결과의 일부를 Table 4에 제시한다

Table 3. Bus passenger OD estimation based on adjusted boarding-alighting counts

Algorithm 1 Bus passenger OD estimation based on adjusted boarding–alighting counts

Input: S : Station Set, $S=\{S_1, S_2, ..., S_N\}$
$B_{i,t}$: number of boardings at S_i at time t
$A_{i,t}$: number of alightings at S_i at time t

Output: Matrix $OD_{ij}^t=\{OD_{ij}^t\}$ where $OD_{ij}^t \in Z_{\geq 0}$
: estimated number of passengers boarding at S_i and alighting at S_j for $1 \leq i < j \leq N$ at time t
N: Total Number of Stations in the specific bus route

1. Initialization
$OD_{ij}^t \leftarrow 0, \ \forall i, j \in \{1, ..., N\}$
$R_{1,t} \leftarrow B_{1,t}$ # Initial boarding at the first station

2. Sequential continuous OD estimation
for $j=2$ to N: // Iterate from the second station to the destination
  $C_t \leftarrow \sum_{k=1}^{j-1} R_{k,t}$ // Total passengers currently on board at time t
  if $A_{j,t} > 0$ and $C_t > 0$ then
    for $i=1$ to $j-1$ do // Distribute alighting passengers to origins
      $OD_{ij}^t \leftarrow A_{j,t} \times \frac{R_{i,t}}{\sum_{k=1}^{j-1} R_{k,t}}$
      $R_{i,t} \leftarrow R_{i,t} - OD_{ij}^t$ // Update remaining passengers from origin i
    end for
  end for
  $R_{j,t} \leftarrow B_{j,t}$ // Add new passengers boarding at current station j
end for

Table 3. Bus passenger OD estimation based on adjusted boarding-alighting counts (continued)

Algorithm 1 Bus passenger OD estimation based on adjusted boarding–alighting counts

3.Scaling (Expansion)

B

A

$\alpha_t \leftarrow B$ // Scaling factor to balance total boardings/alightings

$OD_{ij}^{t} \leftarrow OD_{ij}^{t} \times \alpha_t$

4. Integer Calibration (Largest Remainder Method)

$F_{ij}^{t} \leftarrow OD_{ij}^{t} - \lfloor OD_{ij}^{t} \rfloor$ // Fractional parts

$OD_{ij}^{final,t} \leftarrow \lfloor OD_{ij}^{t} \rfloor$ // Integer parts

$Deficit_t \leftarrow B$

while $Deficit > 0$ do

  $(u, v) \leftarrow \arg max_{(i,j)} F_{i,j}^{t}$ // Find pair with max fractional remainder

  $OD_{uv}^{final,t} \leftarrow OD_{uv}^{final,t} + 1$

  $F_{uv}^{t} \leftarrow -1$ // Exclude from next iteration

  $Deficit \leftarrow Deficit_t - 1$

end while

return $OD^{final,t}$

Table 4. Example of results from estimated bus passenger origin-destination flows

Route no.	Stop name	Seq.	Standard bus stop ID (alighting)	Total boardings	Total alightings	Hour	Remaining passengers	Alightings at stop 1	Alightings at stop 2	...	Alightings at stop 343	Alightings at stop 344
123000010	Jongno 2-ga Intersection (00075)	1	100000001	132	0	00	132	0	0	...	0	0
123000010	Jongno 2-ga Samil Bridege (00025)	2	100000004	0	0	00	132	0	0	...	0	0
123000010	Seoul Museum of History ·Gyeonggyojang ·Kangbuk Samsung Hospital (00079)	3	100000028	112	92	00	152	3	0	...	0	0
123000010	Yeongcheon Market (00081)	4	100000362	160	322	00	160	6	0	...	0	0
100100224	Nonhyeon-dong Hill (00065)	3	122000019	72	268	22	264	7	2	...	0	0
100100224	Yeongdong Market (00063)	1	122000017	144	0	23	144	0	0	...	0	0
100100224	Hakdong Station Exit 5 (00064)	2	122000018	188	213	23	188	7	0	...	0	0
100100224	Nonhyeon-dong Hill (00065)	3	122000019	46	224	23	154	5	3	...	0	0

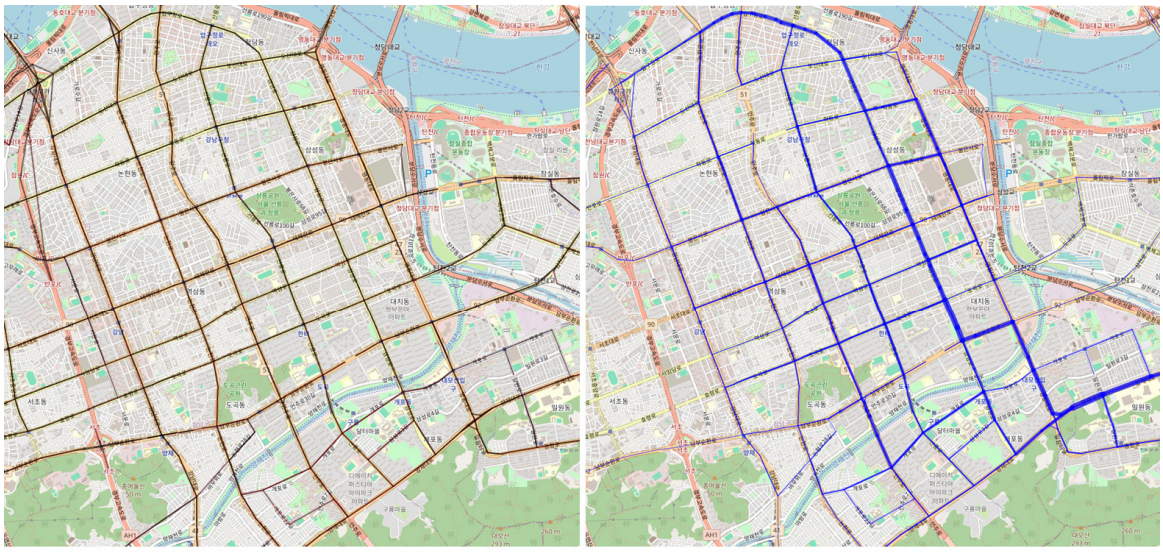
3. OD 흐름 기반 도로 네트워크 구축

본 장에서는 앞서 구축한 도로 네트워크($G=(V,E,W)$)에 승객 OD 흐름 데이터($OD^{final,t}$)를 결합하여, 실질적인 통행 수요가 반영된 OD 흐름 기반 도로 네트워크($G'=(V,E,W')$)를 구축하는 과정을 기술한다. 이는 단순한 도로의 연결성을 넘어 대중교통 이용객의 이동 패턴을 네트워크 가중치(W')로 반영하는 과정이다. 본 연구에서는 OD 흐름 데이터를 DRT 수요와 직접적으로 대응되는 값으로 가정하지 않고, 도시 내 잠재적 이동 수요의 공간적 분포를 나타내는 대리 지표(proxy)로 활용하였다. 따라서 본 연구의 분석은 절대적인 수요 예측이 아닌, 네트워크 상의 구조적 중요도를 기반으로 한 운영 전략 도출에 초점을 둔다.

각 승객 OD 쌍에 대하여 기존 도로 네트워크의 버스 평균 통행시간(t_e)을 비용 함수로 설정하고, 다익스트라(Dijkstra) 알고리즘을 적용하여 통행 비용이 최소화되는 최적 경로를 도출한다. 이후 도출된 최단 경로(P_{ij})를 구성하는 개별 엣지($e \in P_{ij}$)에 해당 OD 쌍의 승객 수요량을 할당한다. 각 엣지 e의 최종 가중치(W_e')는 해당 엣지를 통과하는 모든 OD 경로의 승객 수요를 누적 합산하여 산출하며, 이를 Equation 1과 같이 정의한다.

$$W'_{ij} = \sum_{i,j} P_{ij} \tag{1}$$

이러한 과정을 통해 구축된 OD 흐름 기반 도로 네트워크는 단순한 물리적 구조뿐만 아니라, 실제 버스 승객의 통행 패턴에 따른 엣지별 중요도를 정량적으로 제시한다(Figure 3 참고).



A) G=(*V*, *E*, *W*) ; Base Road Network Weighted by Average Travel Time

B) G'=(*V*, *E*, *W'*) ; Passenger Demand-Informed Network via OD Flow Assignment

Figure 3. Comparative analysis of supply-side travel time (W) and demand-side passenger flow (W') in urban road networks

SNA 중심성 분석

본 장에서는 OD 흐름 기반 도로 네트워크에 SNA를 적용하여 네트워크의 높은 중심성(centrality) 노드를 식별하고, 이를 통해 DRT 운영 가이드라인 수립에 활용하는 과정을 기술한다. 기존의 SNA가 일반적인 연결 관계 분석에 주로 활용되었다면, 본 연구에서는 실제 승객 흐름이 내생화된 네트워크에 이를 적용함으로써 교통 수요가 집중되는 물리적·기능적 중심지를 식별하고, 이를 DRT 운영 가이드라인 구축의 핵심 근거로 활용하는 접근법을 제안한다.

1. 중심성 지표 및 DRT 핵심 구성요소와의 관계

SNA의 중심성 분석에서는 연결 중심성(Degree Centrality), 근접 중심성(Closeness Centrality), 매개 중심성(Betweenness Centrality), 그리고 고유벡터 중심성(Eigenvector Centrality)을 주요 지표로 활용하였다(Freeman, 1979).

연결 중심성은 네트워크 내에서 특정 노드가 다른 노드와 맺고 있는 연결(edge)의 수를 기반으로 측정된다. 연결 중심성이 높은 노드는 단 한 번의 이동으로 접근 가능한 노드가 많아, 즉각적인 접근성과 영향력이 높은 노드를 의미한다. 선행 연구에서는 이를 교통 네트워크의 주요 거점을 식별하는 지표로 활용되었다(Scheurer and Porta, 2006; Jayasinghe, 2014; Kopsidas 2023).

$$C_D(N_i) = \sum_{j=1}^{g} x_{ij}, i \neq j \tag{2}$$

$C_D(N_i)$: 노드 i의 연결 중심성
g : 네트워크에 포함된 전체 노드의 수
x_{ij} : 노드 i와 노드 j 사이의 연결 여부 (연결 시 1, 비연결 시 0)

근접 중심성은 특정 노드에서 네트워크 내 다른 모든 노드까지의 평균 거리가 얼마나 짧은지를 측정하는 지표이다(Freeman, 1979). 근접 중심성이 높은 노드는 평균 접근 거리가 짧아 네트워크 전체에 신속하게 도달할 수 있어 DRT 차량의 대기 장소나 응답성을 극대화하기 위한 노드로 활용하기에 적합하다(Scheurer and Porta, 2006; Jayasinghe, 2014; Kopsidas 2023).

$$C_C(N_i) = \frac{1}{\sum_{j=1}^{g} d(N_i, N_j)}, i \neq j \tag{3}$$

$C_C(N_i)$: 노드 i의 노드 근접중심성
g : 네트워크에 포함된 전체 노드의 수
$d(N_i, N_j)$: 노드 i와 노드 j 간 최단 경로 거리

매개 중심성은 특정 노드가 네트워크 내 다른 노드 쌍 간의 최단 경로 상에 위치하는 정도를 측정하는 지표이다(Freeman, 1979). 매개 중심성이 높은 노드는 네트워크 내 흐름을 제어하거나 매개하는 구조적 허브 역할을 수행한다. 이는 경로 이탈 시 반드시 거쳐야 하는 핵심 허브 혹은 기존 경로가 없을 때 주요 지역 간 연결 허브로 활용 가능하다(Scheurer and Porta, 2006). 매개 중심성은 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$C_B(N_i) = \sum_{j<k} \frac{g_{jk}(N_i)}{g_{jk}}, i \neq j \neq k \tag{4}$$

$C_B(N_i)$: 노드 i의 매개중심성
g_{jk} : 노드 j와 노드 k 사이의 최단 경로 수
$g_{jk}(N_i)$: 노드 j와 노드 k 간의 최단경로 중 노드 i를 포함하는 경로 수

고유벡터 중심성은 단순히 연결된 엣지의 수를 고려하는 연결 중심성의 개념을 확장한 지표로, 중요한 노드와 얼마나 밀접하게 연결되어 있는가를 평가하는 지표이다(Bonacich 1987; Bonacich 2007). 고유벡터 중심성이 높은 노드는 단순히 이용 수요가 높은 지점이 아니라, 주변 핵심 지역들과 강하게 결합된 거점을 의미하므로 효과적인 차량 재배치를 위한 전략적 요충지로 활용 가능하다(Agryzkov, 2019). 이러한 중심성 지표들이 복합적으로 높게 나타나는 노드는 네트워크에서 위치적으로 우위를 차지하며 경제 활동과 교통 수요가 동시에 집중되는 교통 경제적 허브로서의 기능을 수행한다(Wang, 2011). 본 연구는 이러한 중심성 특성을 기반으로 서울시 강남구 네트워크의 구

조적 특성에 부합하는 DRT 핵심 구성 요소를 도출하고, 이를 운영 가이드라인 수립의 근거로 활용한다. 고유벡터 중심성은 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$C_E(N_i) = \lambda \sum_{j}^{g} x_{ij} C_E(N_j), i \neq j \quad (5)$$

$C_E(N_i)$: 노드 i의 고유벡터중심성
λ : 고유벡터값
g : 네트워크에 포함된 전체 노드의 수
x_{ij} : 노드 i와 노드 j 간 연결관계의 인접 여부 또는 가중치

2. OD 흐름 기반 도로 네트워크의 중심성 분석 결과

서울 강남구의 데이터를 기반으로 구축한 OD 흐름 기반 도로 네트워크에 네 가지 중심성 지표를 적용하여 상위 10개 노드를 식별한 결과는 Table 5와 같으며, 그 실제 공간 위치는 Figure 3에 도식화하였다.

Table 5. Results of centrality analysis on the passenger origin-destination network

Degree centrality		Closeness centrality		Betweenness centrality		Eigenvector centrality	
Node	Centrality	Node	Centrality	Node	Centrality	Node	Centrality
1220021100	0.0246	1220021100	0.0985	1220005100	0.2095	1220013800	0.5978
1220011100	0.0205	1220022300	0.0983	1220019100	0.2041	1220063205	0.4292
1220013800	0.0205	1220020500	0.0981	1220003500	0.2009	1220147200	0.2982
1220020000	0.0205	1220027600	0.0981	1220014500	0.1931	1220013000	0.2953
1220048900	0.0164	1220019300	0.0979	1220014300	0.1905	1220063204	0.2858
1220053000	0.0164	1220028500	0.0977	1220005700	0.1891	1220013801	0.2340
1220046900	0.0164	1220028900	0.0974	1220031100	0.1842	1220159001	0.2151
1220063300	0.0164	1220020600	0.0974	1220034100	0.1826	1220147201	0.1817
1210040400	0.0164	1220030000	0.0972	1220015300	0.1807	1220063203	0.1421
1220024400	0.0164	1220018000	0.0970	1220021100	0.1786	1220012901	0.1210

분석 결과, 연결 중심성은 1220021100(0.0246) 노드가 가장 높은 값을 기록하였으며, 상위 4개 노드가 0.02 이상의 값을 보유하여 상대적으로 물리적 연결성이 우수한 것으로 나타났다. 이는 해당 노드들이 다수의 정류장과 직접 연결된 교통 흐름의 분기점으로서 DRT 핵심 정류장으로의 활용 가능성을 나타낸다. 근접 중심성 분석에서도 1220021100(0.0985) 노드가 가장 높은 수치를 보였고 다른 상위권 노드들과 상대적으로 높은 수치를 보였다. 이 노드들은 네트워크 내 타 노드들로부터 시간적·거리적으로 가장 가까운 위치에 존재함을 시사한다. 특히 연결 중심성 1위인 1220021100 노드가 근접 중심성에서도 최상위를 기록한 것은, 해당 지점이 단순히 연결로가 많은 뿐만 아니라 네트워크 전체의 시간적 효율성을 극대화할 수 있는 DRT 차량 대기 정류장으로서의 적합성을 동시에 갖추고 있음을 보여준다. 매개 중심성 측면에서는 상위 3개 노드(1220005100, 1220019100, 1220003500)가 0.20 이상의 높은 값을 보였다. 이는 OD 네트워크 내 교통 흐름이 일부 노드를 중심으로 집중되는 경유 중심적 구조를 반영하며, 이들 노드가 실제 교통 운영상 흐름 제어·분산의 병목 지점(bottleneck) 역할을 수행할 가능성을 시사한다. 고유벡터 중심성(Eigenvector Centrality)은 1220013800(0.5978)에서 상대적으로 높은 값이 관찰되었다. 이는 해당 노드가 단순히 많은 연결을 가진 것을 넘어, 영향력이 큰 인접 노드들과 강력한 결합 구조를 형성하고 있음을 의미한다. 따라서 해당 지점은 단순한 정류장을 넘어 상업 중심지 등 주요 거점과의 연계성이 매우 높은 전역적 핵심 허브로 기능한다고 볼 수 있어, DRT 차량 대기 정류장 후보로 수행 가능함을 보여준다.

본 분석에서 특히 주목할 점은 다중 지표 상위 노드를 발견한 것이다. 노드 1220021100은 연결 중심성 1위, 근접 중심성 1위, 그리고 매개 중심성에도 9위를 기록하며 세 가지 지표 모두에서 최상위권의 위계를 점유하고 있다. 이

는 해당 지점이 많은 도로와 연결되어 있을 뿐만 아니라, 전체 네트워크로의 신속한 전개가 가능하고, 주요 이동 경로 상의 가교 역할을 동시에 수행하고 있음을 정량적으로 증명한다. 따라서 이러한 복합적 위상을 가진 노드는 실시간 호출에 대한 확률적 응답 성능을 극대화할 수 있는 수리적 최적지이므로, 유휴 차량이 상시 체류하는 차량 대기 정류장(Vehicle Staging Station)의 최우선 후보지로 선정할 수 있다. 반면, 고유벡터 중심성이 특화된 노드 1220013800은 인접 허브와의 높은 연계성을 바탕으로 시스템 전체의 차량 공급 균형을 맞추는 차량 재배치 정류장(Vehicle Relocation Station)으로 활용함으로써 지표별 특성에 따른 차별화된 운영 전략 수립이 가능하다.

3. 중심성 지표 간 상호 관계 분석

중심성 지표 간의 Spearman 순위상관분석을 통해 서울시 강남구 도로 네트워크에서 각 중심성 지표 간의 관계를 분석하였으며(Figure 4 참고), 통계적 유의성 검정을 함께 수행하였다(Table 6 참고). 본 분석은 각 지표가 나타내는 기능적 특성 간의 연관성과 독립성을 파악하기 위한 목적으로 수행되었다.

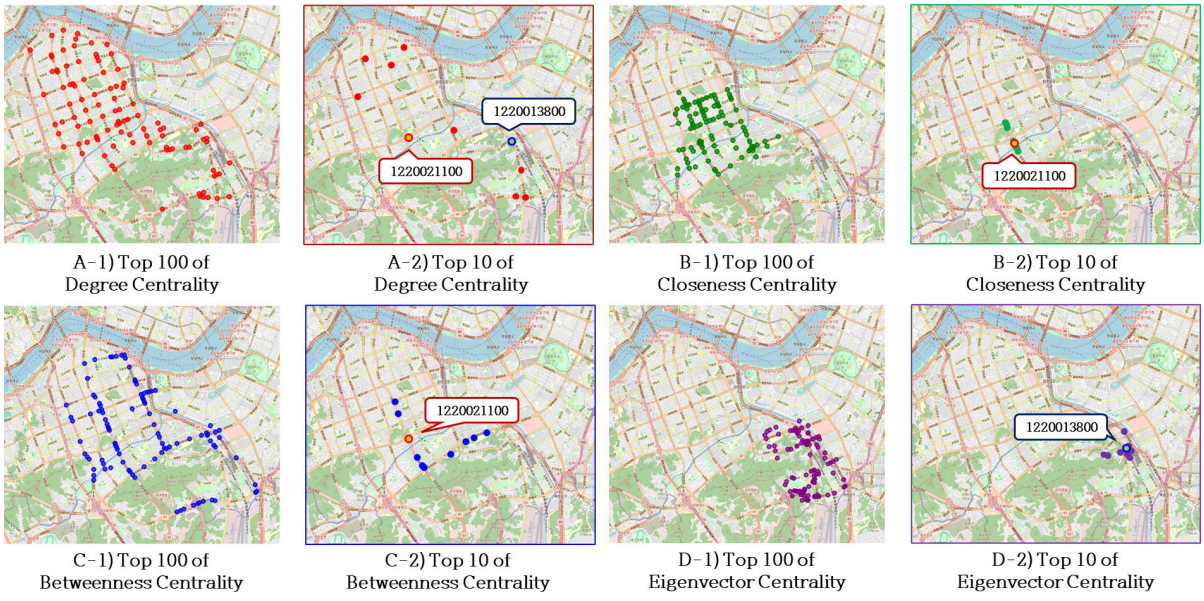


Figure 4. Results of the centrality analysis

Table 6. Spearman's rank correlation analysis among centrality metrics

	Degree	Closeness	Betweenness	Eigenvector
Degree	1.000000	0.251068	0.285177	0.086180
Closeness	0.251068**	1.000000	0.379931	−0.146374
Betweenness	0.285177**	0.379931**	1.000000	−0.101497
Eigenvector	0.086180	−0.146374**	−0.101497*	1.000000

note: * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$

연결 중심성(Degree)은 노드의 물리적 연결성을, 근접 중심성(Closeness)은 네트워크 내 평균적인 접근성을, 매개 중심성(Betweenness)은 통행 흐름의 중개 역할을, 고유벡터 중심성(Eigenvector)은 영향력 있는 노드와의 연결을 기반으로 한 전역적 영향력을 의미한다.

분석 결과, 매개 중심성은 근접 중심성(ρ =0.380, p<0.01) 및 연결 중심성(ρ =0.285, p<0.01)과 통계적으로 유의한 양(+)의 상관관계를 보였다. 이는 네트워크 내에서 접근성이 높거나 물리적 연결성이 우수한 노드일수록, 통행

흐름을 중개하는 역할을 동시에 수행하는 경향이 있음을 시사한다. 즉, 접근성 및 연결성 측면에서 중심적인 노드가 흐름의 경로 상에서도 중요한 위치를 차지할 가능성이 높다는 점을 의미한다.

반면, 고유벡터 중심성은 다른 중심성 지표들과 낮거나 음(−)의 상관관계를 나타냈으며, 특히 근접 중심성과는 통계적으로 유의한 음의 상관관계($\rho = -0.146$, $p<0.01$)를 보였다. 다시 말해, 전역적 영향력은 네트워크 내 특정 구조적 위치 또는 연결 관계에 의해 형성될 수 있으며, 단순한 거리 기반 접근성과는 다른 특성을 가질 수 있음을 시사한다.

또한 연결 중심성과 근접 중심성 간의 상관계수(0.251)가 상대적으로 낮게 나타난 것은, 물리적으로 많은 연결을 가진 노드가 반드시 높은 접근성을 가지는 것은 아님을 보여준다. 이는 네트워크 내에서 연결성, 접근성, 중개성, 영향력 등 다양한 중심성 지표가 서로 다른 기능적 역할을 반영하고 있음을 의미한다.

이러한 결과는 단일 중심성 지표만으로 노드의 역할을 정의하기보다는, 다중 지표를 종합적으로 고려하여 노드의 기능적 특성을 구분할 필요가 있음을 시사한다.

네트워크 중심성과 DRT 핵심 요소 관계 분석

본 장에서는 앞서 수행한 OD 흐름 기반 도로 네트워크 분석 결과를 토대로, 각 중심성 지표의 특성과 DRT 핵심 구성요소를 동시에 고려한 DRT 운영 방안을 제시하고자 한다.

1. DRT의 핵심 구성요소 및 중심성 지표 활용 방안

본 연구에서는 DRT의 효율적인 경로 생성 및 운영 최적화를 위해 정류장 체계를 기능적 역할에 따라 다섯 가지 유형으로 분류한다. 특히 각 정류장의 공간적 위상과 운영 목적을 정합시키기 위해 네트워크 분석의 주요 지표인 중심성(Centrality)을 평가지표로 도입한다.

기종점 정류장(Origin-Destination Stations)은 해당 노선의 기점(Origin)과 종점(Destination)으로서, 차량 운행의 필수적인 노드이다. 주로 환승 거점이나 차고지 인근에 위치하며, 모든 서비스의 시작과 종료 시 필수적으로 정차한다. 본 연구에서는 연결 중심성(Degree Centrality)이 높은 노드를 기종점으로 설정한다. 이는 다수의 간선과 직접 연결되어 교통 흐름의 유입·유출이 활발한 지점을 물리적 요충지로 활용함으로써 시스템 전체의 가동성을 확보하기 위함이다. 필수 경유 정류장(Mandatory Stations)은 기종점 사이의 주요 수요 유발 지역에 배치되어 노선의 기본 골격을 형성한다. 실시간 예약 상황에 따라 정차 시간(Dwell Time)을 탄력적으로 조정하여 운행 효율을 극대화한다. 해당 정류장은 최단 경로 상 위치 빈도를 나타내는 매개 중심성(Betweenness Centrality)을 기준으로 선정한다. 이는 기종점을 잇는 주행 경로 상에서 '교량' 역할을 수행하는 노드를 선정함으로써 경로 이탈을 최소화하고 운행의 직결성을 유지하기 위함이다. 차량 대기 정류장(Vehicle Staging Stations)은 승객의 호출 요청이 없는 유휴 상태(Idle State)의 차량이 체류하는 지점이다. 차기 호출에 대한 반응 시간(Response Time) 및 접근 거리(Access Distance)를 최소화하기 위해, 연결·근접·매개 중심성이 모두 높은 노드를 최적 입지로 선정한다. 연결성을 통한 즉각적인 진입, 근접성을 통한 이동 시간 최소화, 매개성을 통한 주요 경로로의 신속한 합류를 동시에 달성하여 시스템의 평균 응답 시간을 단축하기 위한 전략적 거점으로 기능한다. 차량 재배치 정류장(Vehicle Relocation Station)은 특정 지역에 집중된 수요 편중 현상을 해소하기 위해 차량을 일시적으로 분산하거나 대기 정류장으로 이동하기 전 완충 지점으로 활용되는 정류장이다. 본 연구에서는 연결 중심성과 고유벡터 중심성이 높은 노드를 재배치 거점으로 선정한다. 높은 연결성을 통해 차량 유입을 원활히 수용함과 동시에, 영향력 있는 주요 인접 거점들과 강력하게 결합된 고유벡터 중심성의 특성을 활용하여 시스템 전체의 차량 공급 균형을 유지하고 가용성을 극대화하는 재배치 알고리즘의 핵심 거점으로 활용된다.

2. 적용 사례: 서울시 강남구 사례

서울특별시 강남구 도로 네트워크를 대상으로 수행한 중심성 분석 결과를 종합하면, 각 지표별 위계가 뚜렷하게 나타나는 특정 노드들을 중심으로 최적의 DRT 운영 전략을 도출할 수 있다(Table 7 참고).

Table 7. DRT operation types based on the characteristics of centrality metrics

Key component	Functional role	Centrality metric for optimal location selection
Origin–destination stations	Serve as the origin and terminus of the route and are essential nodes for vehicle operation; typically located near transfer hubs or depots, where all services must stop at the beginning and end of operation	Nodes with high degree centrality (e.g., 1220021100, 1220011100, 1220013800, 1220013800)
Mandatory stations	Located in major demand-generating areas between the origin and terminus, forming the basic backbone of the route	Nodes with high betweenness centrality (e.g., 1220005100, 1220019100, 1220003500, 1220014500)
Vehicle staging station	Locations where vehicles in an idle state (without active calls) wait, with the aim of minimizing the response time to the next request	Nodes with high degree, closeness, and betweenness centrality (e.g., 1220021100)
Vehicle relocation station	Serve as buffer zones to relieve demand concentration in specific areas, maintaining a balanced vehicle supply and maximizing the availability of the entire system	Nodes with high eigenvector centrality (e.g., 1220013800)

먼저, 연결 중심성이 최상위권인 노드 120021100, 1220011100 등은 다수의 간선 도로와 직접 맞닿아 있어 교통 흐름의 유입과 유출이 가장 활발한 지점이다. 본 연구에서는 이러한 물리적 요충지를 기종점 정류장(Origin-Destination Stations)으로 설정하여, 광역 교통수단과의 환승 연계성을 높이고 시스템 전체의 네트워크 가용성을 확보하는 기점으로 활용할 것을 제언한다.

기종점 사이의 주요 통행 경로를 형성하는 필수 경유 정류장(Mandatory Stations)은 매개 중심성이 높은 노드 1220005100, 1220019100 등을 중심으로 배치한다. 이들 노드는 최단 경로 상에 위치하는 빈도가 높아, 실시간 예약 수요에 대응하면서도 경로 이탈을 최소화하여 운행의 직결성을 유지할 수 있는 교량 역할을 수행하기에 적합하다.

특히 노드 1220021100은 연결 및 매개 중심성 뿐만 아니라 근접 중심성에서도 독보적인 수치를 점유하고 있다. 이는 해당 지점이 네트워크 전체에 대한 시간적 접근성이 우수하고 주요 길목에 위치함을 의미한다. 따라서 해당 노드를 호출이 없는 공차 차량이 체류하는 차량 대기 정류장(Vehicle Staging Station)으로 지정함으로써, 강남구 내 임의의 지점에서 발생하는 호출에 대한 평균 응답 시간을 수리적으로 최소화하는 운영 요충지로 활용함이 타당하다.

한편, 고유벡터 중심성에서 높은 수치를 나타내는 노드 1220013800은 단순히 연결된 도로 수가 많을 뿐만 아니라, 주요 상업 밀집지나 지하철역 등 전역적 영향력이 큰 거점들과 긴밀히 연계되어 있다. 따라서 이를 차량 재배치 정류장(Vehicle Relocation Station)으로 설정하여 특정 시간대나 지역에 집중되는 수요 편중 현상을 해소하기 위한 완충 지대(Buffer Zone)로 활용할 것을 제언한다. 이와 같은 지표별 특성 기반의 정류장 배치는 강남구와 같은 다중 허브형 교통망에서 차량 공급 균형을 유지하고 시스템 전체의 서비스 가용성을 극대화하는 핵심 기제로 작용할 것이다.

결론

본 연구는 교통 네트워크의 물리적 토폴로지(Topology)와 이용자의 통행 수요 패턴을 통합적으로 분석하여, 지역별 특성에 최적화된 수요응답형 교통(DRT) 운영 전략을 도출하고자 수행되었다. 이를 위해 물리적 도로망 구성 요소와 버스 정류장 데이터를 결합한 기초 네트워크를 구축하였으며, 승객의 기종점(OD) 흐름 데이터를 가중치로

반영함으로써 실제 통행 수요가 투영된 'OD 흐름 기반 도로 네트워크 모델'을 구축하였다.

구축된 네트워크 기반 중심성 분석(Network Centrality Analysis)을 수행한 결과, 각 지표는 네트워크 내 핵심 거점과 주요 운영 경로를 식별하기 위한 정량적 근거를 제시하였다. 본 연구는 중심성 지표별 위상적 특성에 따라 DRT 운영 체계의 핵심 구성 요소를 기능적으로 유형화하였으며, 이를 서울특별시 강남구에 적용하여 실증적 사례를 제시하였다. 네트워크 중심성의 특성과 DRT 주요 구성요소의 특성을 비교 분석한 결과, 연결 및 매개 중심성이 높은 지점은 DRT 차량의 전략적 재배치 거점 및 서비스 권역 설정의 핵심 노드로 활용될 수 있음을 확인하였다.

본 연구에서 제시한 DRT 운영 가이드라인은 향후 통합 모빌리티 서비스(MaaS) 체계 내에서 중추적인 역할을 수행할 것으로 기대된다. 특히 중심성 분석을 통해 도출된 전략적 거점은 단순한 DRT 승하차 지점의 개념을 넘어, 개인형 이동수단(PM), 도시철도, 광역 버스 등 이종 모빌리티 간의 유기적 연계를 촉진하는 '멀티모달 허브(Multi-modal Hub)'로서의 기능을 수행하게 된다.

결론적으로 본 연구는 기존 정적 노선 체계의 한계를 극복하고, 네트워크 위상과 통행 수요를 통합적으로 고려한 DRT 운영 전략 수립을 위한 구조적 의사결정 프레임워크를 제안하고, 이를 기반으로 운영 가이드라인을 도출하였다는 점에서 학술적·실무적 의의를 갖는다.

다만, 본 연구에서 활용한 OD 흐름은 실제 이용객의 개별 이동 데이터를 직접 관측한 것이 아니라, 공공데이터로 제공되는 정류장 단위 승·하차 집계 데이터를 기반으로 추정된 값이라는 한계를 가진다. 이에 본 연구에서는 해당 OD 데이터를 DRT 수요와 직접적으로 대응되는 값으로 가정하지 않고, 도시 내 잠재적 이동 수요의 공간적 분포를 나타내는 대리 지표로 활용하였다. 또한 실제 DRT 도입 시에는 기존 교통수단과의 경쟁 관계, 노선 효율성, 배차 간격, 서비스 수준 등에 따라 수요 전이 양상이 달라질 수 있다. 따라서 본 연구의 결과는 절대적인 수요 예측이 아닌, 네트워크 구조 기반의 운영 전략 도출 관점에서 해석될 필요가 있다.

향후 연구에서는 수요 전이 및 이용자 반응을 반영한 시뮬레이션 기반 분석을 통해, 추정된 OD 데이터를 적용한 경우와 다양한 수요 시나리오를 비교하고, 제안된 운영 전략이 응답시간, 서비스 커버리지, 공차거리 등 주요 성과 지표에 미치는 영향을 정량적으로 검증할 필요가 있다. 또한 실시간 교통 상황과 수요 변동성을 고려한 동적 네트워크 모델로 확장하고, MaaS 플랫폼 환경에서 DRT의 운영 효율성과 서비스 수준(Level of Service, LOS)을 실증적으로 평가하는 연구가 추가적으로 수행되어야 할 것이다.

ORCID

KIM, Gyu Ri http://orcid.org/0009-0005-7708-0138
BAE, Jang Won http://orcid.org/0000-0002-4681-5059

REFERENCES

Agryzkov T., Tortosa L., Vicent J. F., Wilson R. (2019), A Centrality Measure for Urban Networks Based on the Eigenvector Centrality Concept, Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science, 46(4), 668-689.

Bonacich P. (1987), Power and Centrality: A Family of Measures, American Journal of Sociology, 92(5), 1170-1182.

Bonacich P. (2007), Some Unique Properties of Eigenvector Centrality, Social Networks, 29(4), 555-564.

Calabrò G., Le Pira M., Giuffrida N., Inturri G., Ignaccolo M., Correia G. H. D. A. (2022), Fixed-Route vs. Demand-Responsive Transport Feeder Services: An Exploratory Study Using an Agent-Based Model, Journal of Advanced Transportation, 2022(1), 8382754.

Choi J. H., Kang M. H., Song J. I., Hwang K. Y. (2022), A Study on Introduction of Demand Responsive Transport

(DRT) in Rural-Urban Mixed Area, J. Korean Soc. Transp., 40(3), Korean Society of Transportation, 289-304.

Dauer A., Dias T. G., de Sousa J. P., de Athayde Prata B. (2024), Configurations and Features of Demand Responsive Transports, Transportation Research Procedia, 78, 71-78.

Do M. S. (2014), City Competitiveness and Public Transport System of Provincial Cities, Transportation Technology and Policy, 11(4), Korean Society of Transportation, 119-124.

Freeman L. C., Roeder D., Mulholland R. R. (1979), Centrality in Social Networks: II, Experimental Results, Social Networks, 2(2), 119-141.

Friedman J. H., Bentley J. L., Finkel R. A. (1977), An Algorithm for Finding Best Matches in Logarithmic Expected Time, ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS), 3(3), 209-226.

Hong S. Y., Kim S. J., Yang J. H., Park S. H. (2024), Introduction of Demand-Responsive Mobility Services (DRT) in Seoul, The Seoul Institute, 1-86.

Hwang J. U. (2022), Overseas Policy Cases for Establishing Metropolitan MaaS, Road Policy Brief, 151, Korea Research Institute for Human Settlements, 4-11.

Jayasinghe A., Munshi T. (2014), 'Centrality Measures' as a Tool to Identify the Transit Demand at Public Transit Stops: A Case of Ahmedabad City, India, International Journal of Advanced Research, 2(7), 1063-1074.

Jeong S. B., Yoon H. S. (2019), Structural Characterization of Public Transportation Networks Based on QAP Correlation, Journal of Information Technology Applications & Management, 26(1), Korea Data Strategy Society, 95-102.

Ji Y., Mishalani R. G., McCord M. R. (2015), Transit Passenger Origin-Destination Flow Estimation: Efficiently Combining Onboard Survey and Large Automatic Passenger Count Datasets, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 58, 178-192.

Kim S. H., Sung K. Y., Kim J. C., Kim H. (2023), Exploring the Optimization of Demand Responsive Transit Vehicle Routing Using a Deep Q Network, J. Korean Soc. Transp., 41(6), Korean Society of Transportation, 724-738.

Kim S. Y., Kim M. H., Gim T. H. T. (2024), Exploring the Spatio-Temporal Patterns of Demand Responsive Transport Ridership in Sejong City, J. of Korea Plan. Assoc., 59(2), Korea Planning Association, 93-103.

Kim T. W. (2024), Development of an Optimization Model for Operation Planning of Integrated DRT System Considering Punctuality, Thesis.

Kopsidas A., Douvaras A., Kepaptsoglou K. (2023), Exploring the Association Between Network Centralities and Passenger Flows in Metro Systems, Applied Network Science, 8(1), 69.

Korea Transportation Safety Authority (n.d.), Vehicle Inspection Guide, https://main.kotsa.or.kr/portal/contents.do?menuCode=01080500, accessed March 26, 2026.

Lim S. H., Hong S. J. (2024), A Study on Institutional Support Measures for Revitalizing Demand-Responsive Transport, The Korea Transport Institute, 1-33.

Litman T. (2025), Evaluating Public Transit Benefits and Costs, Victoria Transport Policy Institute (Victoria, BC, Canada).

Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2025), Guidelines for the Introduction and Operation of Demand-Responsive Transport (DRT).

Narayan J., Cats O., Van Oort N., Hoogendoorn S. (2019), Does Ride-Sourcing Absorb the Demand for Car and Public Transport in Amsterdam?, 2019 6th International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS), IEEE, 1-7.

Navick D. S., Furth P. G. (1994), Distance-Based Model for Estimating a Bus Route Origin-Destination Matrix, Transportation Research Record, 1433, 16-23.

Park M. C., Ha T. J., Kwon S. D., Oh S. J. (2019), A Study on the Improvement of the City Bus System Considering Route Circuity, KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research, 39(1), Korean Society of Civil Engineers, 93-103.

Park W. I., Yu Y. S., Yun I. S. (2022), Strategies for Activating Public Transit-Oriented MaaS, Transportation Technology and Policy, 19(3), Korean Society of Transportation, 12-21.

Scheurer J., Porta S. (2006), Centrality and Connectivity in Public Transport Networks and Their Significance for Transport Sustainability in Cities, World Planning Schools Congress, Global Planning Association Education Network.

Seo S. J., Kim J. H. (2024), Selection of Operation Plan Considering Travel Demand: Focusing on the Fixed-Route Transit and the Demand-Responsive Transit, J. Korean Soc. Transp., 42(1), Korean Society of Transportation, 29-46.

Wang J., Mo H., Wang F., Jin F. (2011), Exploring the Network Structure and Nodal Centrality of China's Air Transport Network: A Complex Network Approach, Journal of Transport Geography, 19(4), 712-721.