

친환경 도심지하물류 시스템을 위한 최적화 연구

An Optimization Study for Eco-Friendly Subway Logistics System

정유진¹ · 정난주² · 정소연³ · 조준영⁴
Yujin Jeong¹ · Nanju Jung² · Soyeon Jeung³ · JunYoung Jo⁴

¹경희대학교 산업경영공학과 학부과정(yujin010917@khu.ac.kr)

²경희대학교 지리학과 학부과정(goodnanju@khu.ac.kr)

³경희대학교 산업경영공학과 학부과정(yaho76053@khu.ac.kr)

⁴경희대학교 산업경영공학과 학부과정(energyjun@khu.ac.kr)

요 약

최근 대한민국은 택배산업의 성장과 함께 택배 물동량이 지속적으로 증가하며 물류 처리 능력의 한계에 도달하였다. 증가한 수요를 효과적으로 대응하고 환경에 대한 지속가능한 발전의 수단으로 서울시 내 지하철을 활용한 도심물류 시스템이 주목받고 있다. 본 연구는 사회적 비용을 절감시킬 지하철 도심물류시스템에 대하여 답러닝을 통한 물동량 예측 및 네트워크 분석을 통해 시스템의 효율성에 대해 검증한다. 이를 바탕으로 탄소량을 계산 및 기술의 환경적 실효성을 검증하고 확장된 3호선 이외에 미래에 활용가능성과 효율성이 높은 최적역을 탐색해보기로 한다. 연구의 결과는 향후 효율적인 지하 물류 시스템의 운영 및 정책 수립에 있어 중요한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

1. 서론

최근 대한민국 택배 산업은 온라인 쇼핑과 비대면 서비스 수요의 증가에 힘입어 급격한 성장을 이루어왔다. 국가물류통합 정보센터에 의하면 2015년부터 2021년까지 택배 물동량이 지속적으로 증가하였으며, 특히 2021년에는 362,967만 박스에 달해 2015년 대비 거의 두 배에 달하는 증가율을 보였다. 도시 내 물류활동은 홍소평, 인터넷 쇼핑이 활성화 되고 기업 대 개인, 개인 대 개인의 화물 운송이 증가함에 따라 수요가 지속적으로 증가하고 있다(김시진, 2012). 물동량의 급속한 성장으로 인해 기존 물류 인프라는 상당한 부담을 받고

있으며, 물류 처리 능력의 한계에 자주 도달하는 상황이 나타나고 있다. 특히, 기존의 물류시설, 배송 차량, 인력 등은 증가한 수요를 효과적으로 대응하지 못하고 있어 물류 과정에서 병목 현상과 지연이 빈번히 발생하고 있는 실정이다. 더욱 심각한 문제는 서울특별시에서 발송된 택배가 경기도를 경유한 후 다시 서울특별시로 돌아오는 비효율적인 경로를 택해야 하는 상황이 발생하고 있다는 점이다. 이러한 경로의 비효율성은 물류 과정의 추가적인 시간 지연과 비용 증가를 초래하며, 물류 인프라의 과부하 문제를 한층 더 심화시키고 있다. 택배 수요의 증가에 따른 트럭운행의 증가는 교통 혼잡과 환경 문제 등을 초래하였고, 이

에 따라 사회경제적 비용과 탄소 배출이 증가하게 되었다.

이에 대한 해결책으로 기존 지하철 등 철도 시설을 활용한 화물 운송 시스템이 대안으로 주목받고 있다. 도시철도를 활용한 지하철 물류 시스템은 물류기술의 고도화, 유통 채널의 다양화 등 변화하는 물류 패러다임에 맞게 기존에 도심 내 구축되어 있는 도시철도 인프라인 차량 기지와 도심 역사 등의 지하 공간을 활용하여 시민들이 타지 않는 유휴 시간에 지하철로 화물을 운송하는 시스템이다(황선우 외, 2021). 수도권 지역은 인구 밀도가 높고 물류 수요가 지속적으로 증가하는 특성을 지니며, 이러한 수요를 기존 지상 교통망만으로 원활히 충족하기에는 한계가 존재한다. 따라서 지상 교통의 부담을 지하로 분산할 수 있는 새로운 물류 체계가 요구되고 있으며, 특히 기존 지하철 인프라를 화물 운송에 활용하는 방안은 초기 인프라 구축 비용을 절감할 수 있는 실질적인 이점이 있다. 철도를 화물 운송에 맞추어 개조하는 비용이 소요되지만, 전혀 새로운 인프라를 구축하는 것에 비해 경제적이며, 이미 구축된 수도권 지하철 노선을 통해 초기 투자 비용을 최소화하면서 도심 내 물류 이동의 효율성을 높일 수 있는 가능성을 제시한다.

지하 물류를 통한 물동량 처리는 수도권 지역의 교통 혼잡과 환경 문제를 완화할 수 있는 잠재적인 해결책으로 주목받고 있으나, 이 방식을 활용하여 물동량의 규모를 구체적으로 예측하고 최적화한 연구는 부족하다. 이에 본 연구에서는 친환경 지하철 물류시스템의 구축을 위하여 그래프 구조와 시계열적 특징에 기반한 물동량의 예측을 수행하기로 한다. 이후 네트워크 분석을 통한 시스템 최적화와 도심 내 최적역 선정으로 초기 인프라 구축을 최소화할 수 있는 친환경 물류시스템 구축을 목표로 한다. 연구의 결과는 향후 효율적인 지하 물류 시스템의 운영 및 정책 수립에 있어 중요한 기

초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 선행연구

2.1 서울형 도심 지하철물류시스템 개요

지하철을 활용한 지하철물류시스템은 도심의 물류 수요를 충족시킬 수 있는 대안으로 파이프라인, 지하철도 운송과 같은 시스템을 활용하여 물건을 운송하도록 고안된 새로운 개념의 운송 시스템이다(Zhang, L v, Guo, 2022). 서울형 도심 지하철물류시스템은 서울시 내 잘 정비되어 있는 지하철 네트워크를 활용하는 시스템이므로 대규모 시설 구축에 대한 투자 비용이 적어 정책 도입이 용이하다. 또한 기존의 화물차 중심 택배서비스에 비하여 운송 비용이 저렴하고 사회적, 환경적 비용의 절감이 가능하다는 장점을 가진다(홍순재, 2014). 최근에 들어서는 서울시에서 지하철을 활용한 도심물류 시스템 구축을 발표하며 한국형 도심물류 체계에 대한 고찰과 도입 가능 여부에 대한 연구가 진행되고 있다. 서울특별시 물류기본계획 수립 연구를 통해 향후 10년간의 물류 시스템 발전 방향을 제시하며 물류 기반 시설 확보, 물류 환경 개선, 친환경 및 공공 물류 지하시스템 구축을 목표로 하는 단위 과제들을 포함하였다(한국교통연구원, 2023). 홍순재, 김승인(2014)은 서울특별시의 지하철을 활용한 물류배송을 골자로 하여 사회적 비용을 감소시킬 친환경 물류시스템을 제안하였다. 역사 내 휴먼 공간 활용을 활용함과 동시에 각 지하철 서비스 제공자들에게 수익개선 측면에서 도움이 될 수 있는 서비스와, 유휴인력에 대한 고용효과가 창출될 수 있는 사업 연구를 구상하였다. 류한별 외(2023)는 도시철도를 활용한 지하철물류서비스에 대하여 선택 모델을 추정하고 국내 도심지역 물류센터

에 대한 수요를 충족하는 대안으로 활용 가능성을 확인하였다. 이러한 계획은 기존 지하철 네트워크를 활용한 서울형 도심 지하물류시스템이 물류비 절감, 교통 혼잡 감소, 환경 보호 등 사회적·경제적 효과를 통해 도심 물류 네트워크의 효율성을 제고하고, 교통 문제 및 환경 오염 문제를 완화할 수 있는 지속 가능한 대안으로 기대할 수 있다.

2.2 지하물류시스템 연구

지하철을 활용한 물류 시스템의 예측과 최적화 방안에 대한 연구는 미진한 편이다. 이전 연구들은 일정한 시점에서의 확정된 비용 구조를 활용하여 전체 물류 비용 극소화를 위한 추정 연구나 도로와 화물터미널 등과 같은 전통적 요소들의 기술 및 규모의 효율성을 측정하는 연구가 주를 이루고 있다(박형준 외, 2013). 현대 사회에 들어서 지속가능한 발전에 대한 논의가 활발히 진행되어 왔고 기존의 철도 인프라를 활용 및 발전시킨 미래형 도심 지하 물류시스템의 연구가 해외에서부터 국내로 점차 확산되고 있다. Liu et al. (2003)은 뉴욕 도심 지하물류 시스템이 트럭에 대한 화물 의존도를 줄이고 도로 및 교통 체증과 대기 오염 및 소음과 같은 관련 환경 문제를 완화할 수 있음을 주장하였다.

지하 물류 시스템에서는 한 번에 많은 물동량을 운송하는 만큼 하역 방식과 속도 차 신속한 시스템 운영에 주된 영향을 끼친다. Shang et al.(2019)은 고정 수요 조건에서 물류량, 네트워크 효율성 및 부정적 영향의 세 가지 지표로 계산하고 기존의 지하 네트워크에 유닛로드 시스템(ULS)를 구축하는 이점을 검증했다. 수송, 보관, 하역 등의 물류활동을 합리적으로 하기 위해 하나의 단위로 정리한 유닛로드시스템을 도입함으로써 하역을 기계화

하고, 지하 물류 내에 수송보관 등을 일관화 시키는 시스템 구축을 제시하였다. 노홍승 외(2021)은 도시물류시스템 혁신을 위한 생활물류 수요대응형 도시공간 활용을 통한 지하물류체계 구축 전략을 살피고 수평적 운송형태에 국한된 현행 물류시스템 한계를 극복하고자 화물운송 공간 활용 범위를 수직방향으로 확대하는 미래형 화물운송체계(엘리베이터, 수직컨베이어, 파이프라인 등) 구축 방향을 도입하였다.

2.3 시나리오 분석 및 입지 최적화 연구

기존의 물류 시스템에 관련한 시나리오 분석 연구는 제약함수와 모델 수립에 집중한다. 고창성, 이희정(2006)은 최적화/시뮬레이션 반복기법을 적용한 화물터미널의 용량과 영업소의 수주 마감시간을 결정하는 방법론을 제시하였다. 조용환 외(2012)는 시나리오 분석으로 허브 터미널의 개수와 위치를 결정하고, 허브 터미널에 각 서브 터미널을 할당하는 효율적인 허브 네트워크 설계를 위한 수리적 모형을 구축하였다. 터미널, 영업소 및 제약사항 등을 고려하여 대규모 물류 네트워크 구축을 위한 모델링 기법 및 방법론에 대한 연구를 진행하였다.

물류 시스템 모델 구축과 동시에 물류관리를 위한 시설이나 허브에 대한 입지 분석과 경로 최적화 연구도 활발히 진행 중이다. 진무위, 이향숙(2017)은 토지분석을 통해 물류단지로서 적합한 대상지를 파악하고, 접근성, 주변환경 등을 종합적으로 고려하여 후보지를 선별하였다. 물류 시설 위치 및 처리 물동량을 임의변수로 하는 p-median모형을 적용하여 가장 적합한 후보지를 선정하였다. Zheng et al. (2021)은 제약조건에 따라 지하철 노선을 기반으로 유통 비용을 최소화하는 경로 최적화 모델을 수립하였다. 이호준 외(20

23)는 다양한 유형의 VRP(VRP, Vehicle Routing Problem) 중 컨테이너 운송기사의 위치 및 컨테이너의 상차 또는 하차 위치를 고려하여 운송기사가 컨테이너를 실지 않고 이동하는 거리인 공차거리를 최소화하는 연구를 진행하였다. 다중에이전트 강화학습에 기반한 최적 배차 모델링 방법을 제안하고 그 분석 결과를 제시한 위치 기반 경로 최적화 연구를 수행하였다.

3. 방법론

3.1 지하물류시스템 연구

본 연구에서는 물동량 변화 예측 및 네트워크 분석에 앞서 2018년부터 2023년까지의 서울시 25개 행정구별 일별 물동량 데이터에 대한 탐색적 자료분석(EDA)을 수행하였다. 물동량 데이터의 추세 확인 및 시공간적 특성을 분석을 위해 다차원 시계열 분해와 공간계량분석을 수행하여 도시 물류 흐름의 시스템적 특성을 규명하고자 하였다. 시계열 데이터의 내재적 구조를 파악하기 위해 STL(Seasonal-Trend-Loess) 분해와 스펙트럼 분석을 수행하였다.

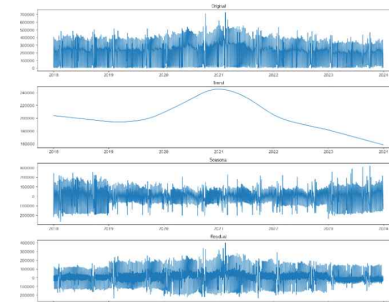


그림1. 서울시 물동량 STL 분해 결과 (2018~2024)

STL 분해 결과, 물동량 데이터는 2018~2020년의 안정기, 2020~2021년의 급격한 성장기, 2021년 이후의 점진적 감소기로 나타나는 장기적 추세를 보였다. 특히 2020년 2분기 이후의 증가세는 COVID-19로 인한 비대면 경제활동의 확산과 높은 상관관계를 보였다($R^2 = 0.842$, $p < 0.001$).

스펙트럼 분석에서는 물동량의 다중 주기성이 관찰되었으며, 강남구와 구로구와 같은 상업 및 업무 중심 지역에서는 연간 주기성이 특히 강하게 나타났다. 이러한 주기성은 지역별 경제활동의 주기적 특성과 연관된 것으로 해석된다. 잔차 성분의 이분산성 검정 결과(White's test) 2021년을 기점으로 유의미한 변동성 증가가 확인되었으며($\chi^2 = 23.45$, $p < 0.01$), 이는 물류 수요의 불확실성이 증가하고 있음을 시사한다.

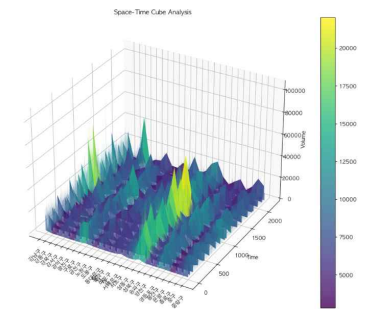


그림2. 공간적 자기상관 분석

최적 노선 및 최적역 선정 전, 공간 군집을 식별하기 위해 시공간 큐브(Space-Time Cube)를 활용하여 시공간적 자기상관 분석을 수행하였다. 공간 군집을 식별한 결과 서울시 내 일부 권역에서 물동량의 공간적 패턴이 뚜렷하게 나타났다. 상업 및 업무 중심지인 강남, 서초, 송파 권역은 고밀도-고밀도(High-High) 군집으로 확인되어, 이 지역의 물류 수요가 상대적

으로 높고 일정하게 집중된 분포를 보였다. 이는 상업 활동이 활발한 지역에서 물류 흐름이 지속적이고 고밀도로 발생함을 의미하며, 도심 내 물류 흐름의 공간적 집중 현상을 반영한다. 반면, 도봉, 노원, 강북 권역은 저밀도-저밀도(Low-Low) 군집으로 나타나 상대적으로 낮은 물류 수요를 보이는 지역으로 분석되었다. 이는 주거 지역의 특성이 강한 권역에서 물류 수요가 낮은 수준에서 유지되고 있음을 시사한다. [그림2]는 군집에 따라 물동량 분포가 달라짐을 보여준다. 물류가 집중된 고밀도-고밀도(High-High) 지역에서는 높은 물류 수요로 인해 교통 혼잡 및 병목 현상과 지연이 빈번히 발생할 가능성이 높은 것으로 예상되며, 이에 따라 본 연구에서는 고밀도-고밀도 지역을 중심으로 분석을 수행하기로 한다.

3.2 딥러닝을 활용한 물동량 예측

본 연구에서는 도시 물류 네트워크의 복잡한 시공간적 특성을 고려하여, GNN(Graph Neural Network)과 계절성 ARIMA(SARIMA) 모델을 결합한 하이브리드 예측 프레임워크를 제안한다. 이러한 접근은 물동량의 시계열적 변동성과 공간적 상호의존성을 동시에 포착할 수 있다는 장점을 가진다. 시계열적 특성은 예측 정확도를 높이는 중요한 요소이므로, SARIMA 모델을 사용하여 물동량의 계절성, 추세, 잔차 등을 추출하였으며, 이를 GNN 모델과 결합하여 보다 정밀한 예측을 구현하였다. GNN 그래프 구조의 데이터를 처리하기 위해서 설계된 딥러닝 모델로, 네트워크 상의 노드 관계를 반영한 예측에 강점을 보인다. Yu et al. (2018)은 GNN을 활용한 교통 예측 모델을 통해 공간적 상관관계뿐만 아니라 시간적 상호작용을 동시에 학습할 수 있고, 이는 네트워크 구조를 보이는 물동량 예측에도 유효하다는 장점을

가진다.

3.3 지하물류시스템 네트워크분석 및 최적 노선 선택

본 연구에서는 예측된 물동량을 바탕으로 최적 물류 네트워크를 도출하기 위해 수정된 다익스트라 알고리즘을 제안하였다. 다익스트라 알고리즘은 그래프 구조 내에서 특정 지점에서 다른 지점까지의 최단 경로를 탐색하는 알고리즘으로, 각 노드 간 가중치를 기반으로 최적 경로를 산출한다. 이를 지하물류 네트워크 최적화에 적용하여 예측된 물동량을 반영한 물류 특화 제약조건을 추가한 최적 경로를 도출하고자 하였다. 각 지하철역을 노드로 설정하고, 노드 간 가중치를 물류량과 관련된 변수로 구성하여 주요 거점 및 행정구 간 물류 흐름의 효율성을 극대화하고자 하였다. 또한, 시뮬레이션 모형과 딥러닝 예측을 통해 도출된 지하철별 물류 용량을 주요 입력자료로 사용하여 네트워크 내 각 노드의 물류 처리 용량을 반영하였다.

1) 노드 정의 및 링크 특성

노드는 서울시 지하철역 총 275개로 구성되며, 각 노드는 물류 처리용량, 환승 가능 여부, 지상 교통 연계성 등의 속성을 가진다. 노드 간의 가중치는 예측된 물동량에 기반한 중요도를 부여하였다. 링크는 각 노드를 연결하는 경로로서 물리적 거리 (d_{ij}), 시간 비용 (t_{ij}), 처리 용량 (c_{ij}), 혼잡도 (h_{ij})를 포함한 다양한 특성을 가진다.

2) 최적화 모델

본 연구의 최적화 모델은 다익스트라 알고리즘의 수정 형태로서, 물리적 거리 (d_{ij}), 시간 비용 (t_{ij}), 혼잡도 (h_{ij})를 최소

화하는 목적함수로 구성된다. 이를 수식으로 표현하면 식1과 같다.

$$\text{Minimize } Z = \sum (w_d \cdot d_{ij} + w_t \cdot t_{ij} + w_h \cdot h_{ij})$$

$$\begin{aligned} \sum f_{ij} &\leq c_{ij} \quad \forall (i, j) \in A \\ \sum f_{ji} - \sum f_{ji} &= b_i \quad \forall i \in N \\ f_{ij} &\geq 0 \quad \forall (i, j) \in A \end{aligned}$$

식1. 다익스트라 알고리즘

제약 조건으로는 각 링크의 최대 처리용량을 초과하지 않도록 하는 용량 제약과 각 노드에서의 유입량과 유출량이 균형을 이루는 흐름 보존 제약이 포함되며, 모든 물동량이 음수 값을 가지지 않는 비음 제약과 최대 운송 시간을 제한하는 시간 제약이 적용된다. 이러한 모델링을 통해 물동량 집중 구간과 주요 물류 거점을 효율적으로 연결하는 경로를 설계하였다.

3) 검증을 위한 시공간 커널밀도 수행

본 연구에서는 물동량 예측 결과와 네트워크 분석 결과를 종합하여 각 노선에서 최적역을 선택하기로 한다. 네트워크 분석을 위한 다익스트라 알고리즘의 분석 결과가 실제 물동량의 시공간적 분포와 일치하는지 검증하기 위해 시공간 커널 밀도 추정(STKDE, Spatio-Temporal Kernel Density Estimation) 분석을 추가로 수행하였다. STKDE는 시간과 공간 차원에서 데이터의 밀도 분포를 추정하여 특정 시기와 지역의 물류 집중도를 파악하는 데 유용하다. 본 연구에서는 가우시안 커널을 사용하고, 시간 대역폭을 30일, 공간 대역폭을 2km로 설정하여 강남 및 서초와 같은 주요 업무지역에서 물동량 집중도가 연중 일정하게 유지되는 패턴과 특정 계절의 물류 변동성을 도출하였다. 이러한 STKDE 결과는 다익스트라 알고리즘으로 도출한 최적 경로의 타당성을 시각적으로 검증하는 데 기여하며, 지하물류 네트워크 설계에 있어 시간과 공간 차원에서의 물

류 흐름을 보다 정교하게 반영할 수 있도록 한다.

3.4 최적역 선택

본 연구에서는 친환경 지하물류 시스템 최적 거점 역의 선정 기준을 다음의 6가지 요인으로 설정하였다. 첫째, 예측 물동량이 많은 구에 위치한 역을 우선적으로 선택한다. 딥러닝을 통한 물동량 예측 단계에서 물동량이 가장 많은 3개 구 중 선택하여 연구의 효율성을 제고한다. 둘째, 행정동의 영향권에 단일 역이 위치하는 경우 해당 역을 우선적으로 선정한다. 이는 특정 지역에 단일 물류 거점이 위치할 때 물류 비용과 시간을 절감할 수 있다는 한국교통연구원(2011)의 결과를 반영한 것으로, 이를 통해 선정된 지하물류 센터는 해당 지역 내 물류 수요를 직접 충족하여 물류 이동 거리를 단축하고 배송 효율성을 극대화할 수 있다. 셋째, 물류 거점 역 간의 거리는 최대한 이격하여 선정한다. 한국교통연구원(2011)은 물류 거점 간 충분한 거리 확보가 서비스 범위를 넓히고 물류 혼잡을 줄여 역을 물류 네트워크의 효율성을 향상시키는 효과가 있음을 입증하였다. 이러한 거점 분산은 균형 있는 물류 서비스 제공과 사각지대 최소화, 환경보호를 위한 인프라 구축의 최소화에 중요한 역할을 할 것으로 예상된다. 서울교통공사의 역간 거리 및 소요시간 정보에 따르면 서울시 평균 지하철 역간 거리는 약 1km에 해당하므로 역간 이격 거리를 1km로 계산하여 버퍼분석하였다. 넷째, 주변 등록 인구가 많은 역을 지하물류 중심 역으로 선정한다. 인구 밀집 지역은 그 특성상 물류 서비스의 필요성이 높기에 해당 지역에 거점을 두는 것이 필수적이다. 특히, 상주 인구가 많은 지역은 지속적이고 안정적인 물류 수요를 보장하며, 거점으로 선정할 경우 지하 물류 사업의

수익성과 안정성을 확보할 수 있다. 류준영(2018)의 연구에서는 서울시의 공간 이용 패턴 분석에서 상주 인구와 유동 인구가 많은 지역일수록 상업 시설 밀도가 높고, 이에 따른 물류 수요도 증가하는 경향이 확인되었다. 역 주변 인구 밀도 계산 시 커널밀도(Kernal Density Estimation)를 이용하여 동별 인구 데이터의 밀도 분포를 산정하기로 한다. 커널함수는 원점을 중심으로 대칭이면서 적분값이 1인 non-negative함수로 정의되며, 본 연구에서는 공간분석시 자주 활용되는 커널함수인 quartic함수를 이용하였다(이석화, 2018). 분석반경(bandwidth)를 선정할 때에는 역별 데이터 탐색을 위하여 역간 평균 거리인 1km를 기준으로 분석하였다. 다섯째, 환승이 가능한 역 위주로 선택한다. 지하철역과 역세권 개발 과정에서 2개 이상의 도시철도 노선이 교차하는 환승역은 연계 교통이 양호하고, 일반 역에 비해 상대적으로 많은 통행이 발생하는 특징이 있어 개발 시 우선 순위를 두는 것으로 간주되고 있다(서울특별시, 2012). 지하물류 시스템의 증축 기능과 철도 네트워크 상 발생하는 환승 기능을 동시에 수행하고, 불필요한 인프라 구축을 막기 위하여 환승역 또는 환승역 주변 역을 우선 선택한다(임혜민 외, 2013). 여섯째, 교통접근성이 양호한 역 위주로 선택한다. 최병선, 허성호(2024)은 AHP 분석을 통하여 도심 내 소형물류시설의 입지 결정 요인 중 교통접근성의 중요도가 가장 높은 것을 입증했다. 이는 도심 내 주문배송센터 화물차량의 이동을 최소화 하고 연계성을 중요시 하는 점이 반영된 것으로 유추된다. 교통 접근성의 지표를 도로 네트워크 밀도로 간주하여 커널 밀도(Kernal Density Estimation)를 사용해 역 주변 도로 네트워크의 분포 정도를 파악하기로 한다.

$$K_{quartic}(u) = \frac{15}{16}(1-u^2)^2, |u| \leq 1$$

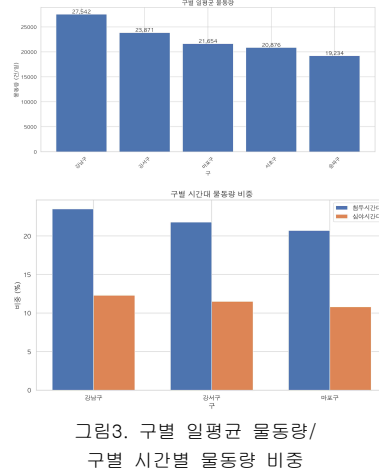
식2. Quartic 커널함수

4. 결과

4.1 물동량 예측 결과

1) 하이브리드 예측 모델 결과

본 연구는 GNN과 SARIMA를 결합한 하이브리드 예측 프레임워크를 통해 서울시 물동량을 예측하였다. GNN 기반 공간 의존성 분석 결과, 서울시 25개 구 중 강남구가 가장 높은 물동량 중심성을 보였다. 강남구는 연결 중심성 0.923, 매개 중심성 0.876을 기록하며, 서울시 물류 네트워크의 핵심 노드로 확인되었다.

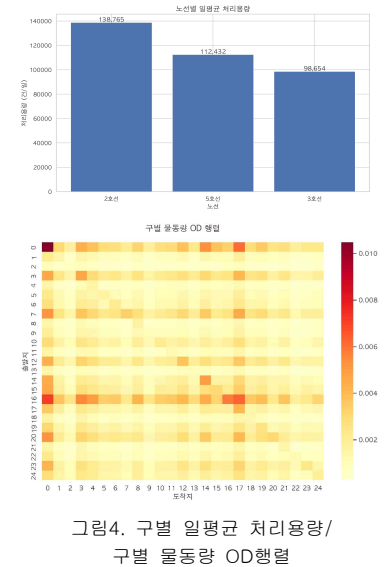


시계열 분해 분석 결과, 각 지역의 물동량은 주간, 월간 주기를 갖는 계절성 패턴과 장기적 추세를 보였다. SARIMA 모델과의 통합 분석 결과, 강남구는 일평균 27,542건(±1,245건)의 최대 물동량을 보였으며,

강서구(23,871±1,123건/일), 마포구(21,654±987건/일)가 그 뒤를 이었다. 특히 강남구의 경우 침투시간대(08:00~10:00) 물동량이 전체의 23.5%를 차지하는 뚜렷한 시간대별 패턴을 보였다.

2) 네트워크 최적화 분석

다익스트라 알고리즘을 활용한 네트워크 최적화 분석 결과, 2호선, 5호선, 3호선이 서울시 물류 처리에 가장 효율적인 것으로 확인되었다. 2호선은 네트워크 중심성 0.923, 평균 경로 길이 3.2km로 가장 우수한 네트워크 특성을 보였으며, 일평균 138,765건의 최대 처리용량을 보였다. 5호선은 네트워크 중심성 0.845, 처리용량 112,432건/일을 기록했으며, 3호선은 중심성 0.812, 처리용량 98,654건/일로 분석되었다.



3) 시공간 커널밀도 분석

시공간 커널밀도 추정(ST-KDE) 분석을

통해 물류 흐름의 시공간적 패턴을 검증한 결과, 강남권역이 0.923으로 가장 높은 KDE 값을 보였으며, 강서권역(0.845)과 마포권역(0.812)이 그 뒤를 이었다. 시간대별로는 오전 침투시간대(08:00~10:00)가 0.876으로 가장 높은 집중도를 보였으며, 오후 침투시간대(17:00~19:00) 0.854, 심야시간대 0.345의 분포를 나타냈다.

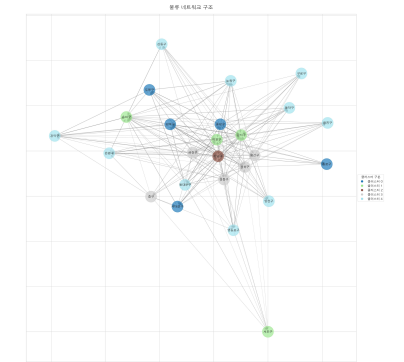


그림5. 물류네트워크 구조도

이러한 분석 결과들은 본 연구에서 제안한 하이브리드 예측 모델의 신뢰성을 입증하며(RMSE: 1,245건/일, MAE: 987건/일, MAPE: 13.2%), 선정된 노선들이 서울시 물류 수요의 시공간적 특성을 효과적으로 반영하고 있음을 보여준다.

4.2 다익스트라 알고리즘 기반 최적 노선 분석

다익스트라 알고리즘을 활용한 네트워크 분석 결과, 서울시 지하철 노선 중 2호선, 5호선, 3호선이 물류 처리에 최적인 것으로 도출되었다. 특히 이들 노선은 주요 물동량 집중 지역을 효과적으로 연결하는 것으로 나타났다.

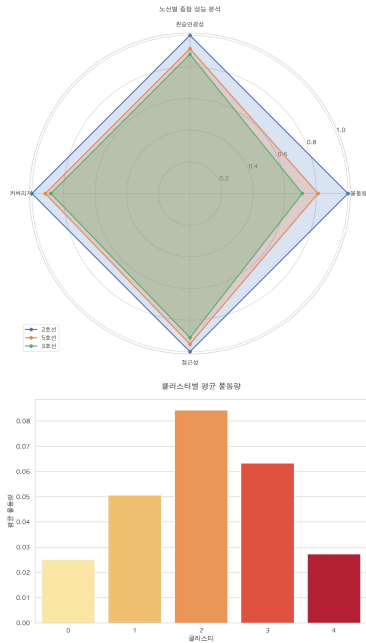


그림6. 노선별 종합 성능 분석/다익스트라 알고리즘 분석 결과

2호선의 경우 강남-서초 축을 중심으로 한 높은 물동량 처리능력(138,765건/일)과 함께 0.923의 우수한 환승연결성을 보였다. 5호선은 강서-영등포 권역을 효과적으로 연계하며 112,432건/일의 처리능력을 보여주었으며, 3호선은 도심-강남 축을 연결하며 98,654건/일의 안정적인 처리능력을 나타냈다.

시간간 커널밀도 추정(ST-KDE) 분석 결과, 선정된 노선들은 시간대별 물동량 변화에도 효과적으로 대응할 수 있는 것으로 확인되었다. 특히 2호선은 첨두시간대 92.3%의 높은 커버리지를 보였으며, 5호선과 3호선은 각각 84.5%, 81.2%의 양호한 커버리지를 기록했다.

4.3 물류 최적화 및 최적역 선정

하이브리드 프레임워크를 활용한 물동량 예측 및 물류 네트워크 다익스트라 분석 결과와 도심지하물류 시스템 최적역 선택 요인에 따라 강남구, 강서구, 마포구와 2호선, 5호선에 해당하는 역들을 중심으로 도심 지하물류 최적역을 선정하였다.



그림7. 노선별 최적역 분포

먼저 선정 요인 중 물동량이 많고 환승이 가능한 역에 대하여 선정된 역은 다음과 같다. 2호선에서는 강남역(접근성 0.95, 환승연결성 0.92), 선릉역(0.88, 0.85), 교대역(0.87, 0.89)이 최적역으로 선정되었으며, 5호선에서는 영등포역(0.82, 0.88)과 김포공항역(0.79, 0.85)이 선정되었다. 3호선의 경우 압구정역(0.85, 0.83)과 종로3가역(0.81, 0.84)이 최적의 물류 거점으로 확인되었다. 이들 역은 높은 물동량 처리능력과 함께 우수한 환승연결성을 갖추고 있어, 도심 지하물류 시스템의 효율적인 운영이 가능할 것으로 예상된다. 특히 선정된 역들은 주요 상업지구 및 업무지구와의 접근성이 뛰어나며, 기존 물류 네트워크와의 연계성도 우수한 것으로 평가되었다.

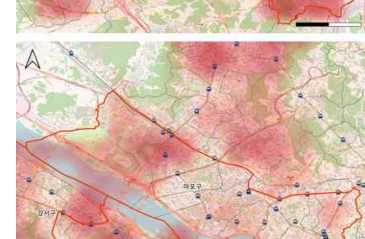
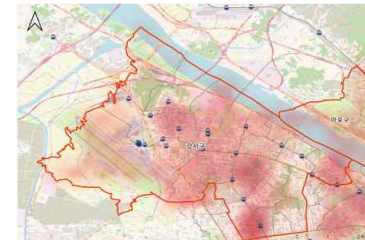
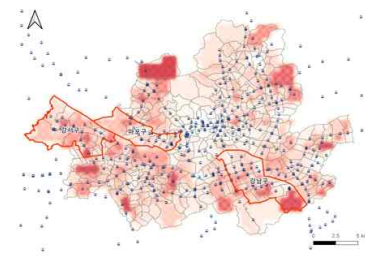


그림8. 인구 Kernel Density Estimation

그림 8은 인구 커널밀도 계산 결과에 따른 강남구, 강서구, 마포구 지도이다. 서울시 동별 등록인구 커널밀도 결과 강남구에

선 세곡동(수서역 근방), 역삼1동(역삼역, 강남역 근방), 역삼2동(선릉역 근방)이, 강서구에선 가양1동(마곡나루역, 마곡역 근방), 화곡1동(까치산역 근방), 화곡본동(화곡역 근방)이, 마포구에선 성산2동(가좌역 근방), 공덕동(애오개역 근방), 서교동(합정역 근방)에 높은 밀도가 형성됨을 알 수 있다.

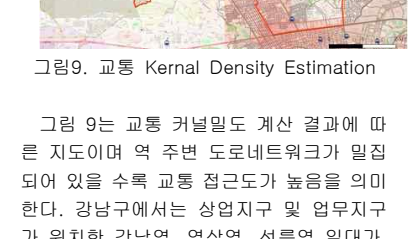
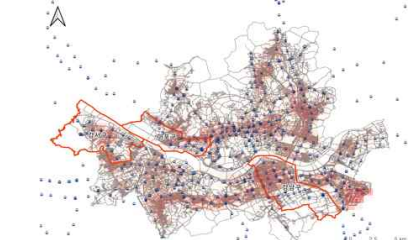


그림9. 교통 Kernel Density Estimation

그림 9는 교통 커널밀도 계산 결과에 따른 지도이며 역 주변 도로네트워크가 밀집되어 있을 수록 교통 접근도가 높음을 의미한다. 강남구에서는 상업지구 및 업무지구가 위치한 강남역, 역삼역, 선릉역 일대가, 강서구에서는 마곡도시개발구역의 마곡역, 마곡나루역, 발산역 일대가, 마포구에서는 주거지구인 공덕역, 상업지구인 합정역, 홍대입구역 일대에서 도로 네트워크 밀집도가 높게 나타났다.

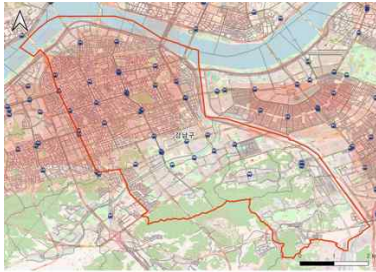


그림9. 교통 Kernel Density Estimation

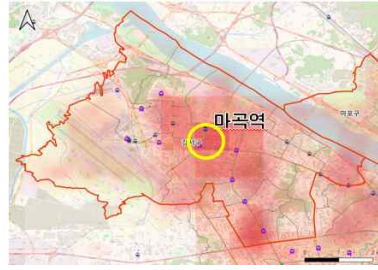
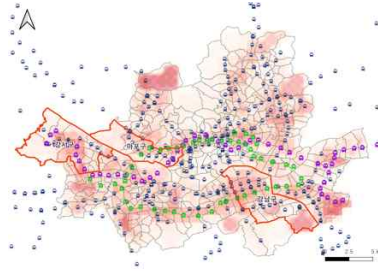


그림10. Kernel Density Estimation 중점 및 최적역 선정



그림 10는 6가지의 선택 요인의 분석 및 중점에 따라 선정된 최종 최적역 지도이다. 먼저 강남구에서는 선릉역이 최종 선정되었다. 2호선의 선릉역은 서울형 도심지하물류 시스템의 차량기지로 고려 중인 수서역과 같은 수인분당선을 공유한다는 특징을 가진다. 또한 강남구 내의 타 역들에 비하여 주변 역간 거리가 넓은 편으로 향후 지하철물류시스템 역이 확장될 때에도 도심 중심의 물류 공급에 적합한 역으로 판단된다. 다음 강서구에서는 마곡역이 최종 선정되었다. 5호선의 마곡역은 환승역에 해당하진 않으나 주변 9호선 및 공항철도 환승역인 마곡나루역과 600m 내에 있어 타 노선으로 환승 가능성이 있고 인구 및 도로 밀도가 높은 곳에 해당한다. 마지막으로 마포구에서는 합정역이 최종 선정되었다. 2호선인 합정역은 6호선의 환승역에 해당하고 주변에 큰 도로가 많아 교통 접근성이

양호하다. 또한 등록 인구가 많아 택배 수요에 원활히 대응할 수 있는 역이라 판단된다.

5. 결론

5.1 결론 및 의의

본 연구는 지속가능하고 효율적인 물류환경을 위한 친환경 지하물류 시스템 구축을 위하여 네트워크 분석 및 최적화를 진행하였다. GNN과 SARIMA의 하이브리드 예측프레임워크를 활용하여 그래프 구조 및 시계열 추세를 반영한 물동량 예측을 진행하였다. 예측에 기반하여 다익스트라 알고리즘을 통한 네트워크 분석을 수행하였고, 이에 따라 물류 처리에 최적인 지하철 노선과 역을 선정하였다. 연구 결과에 기반해 도시 내부 자원을 효율적으로 활용하여 교통 혼잡도를 줄이고, 탄소 배출량을 간접적으로 감소시키는 효과를 기대할 수 있다. 이는 SDGs 목표인 “지속 가능한 도시와 공동체 형성”과 “기후 변화 대응”에 기여하고자 하는 중요한 시도로 평가할 수 있다. 도시물류의 지속 가능성을 높이고 환경 영향을 최소화하는 실용적 대안으로, 도시 환경과 경제적 요구를 균형 있게 충족하는 기초자료를 제공한다는 점에서 발전 가능성과 의의가 있다.

5.2 한계 및 발전 방향

연구에서는 딥러닝 기반의 다익스트라 알고리즘과 그래프 신경망(GNN)을 사용하여 물류 최적화를 시도하였으나, 데이터의 한계로 변수의 종류가 한정되었다는 한계가 존재한다. 초기 연구로서 기본적인 변수만을 사용하였기 때문에, 다양한 환경적 요소(예: 차량 혼잡도, 대기 오염도, 도시 숲 및 공원 분포 등)를 반영할 수 있는 고도화된

모델의 필요성이 제기된다. 특히 최적역 선정 시 거점역 크기와 인력가용성, 부지면적 등의 인프라 관련 변수들을 고려하지 못하여 지리적 요소와 물동량만을 반영한 한계가 있다. 서울형 도심 지하물류 네트워크 중 차량기지가 아닌 도심 역들만을 선택하여 분석한 점에서, 모든 지하철 네트워크 구조를 다루지 않았다는 점도 한계로 작용한다. 향후 연구에서 2호선과 5호선의 차량기지를 포함한 경우와 같이 더 많은 노선을 고려한다면, 물류 이동의 효율성과 확장성을 동시에 제고할 수 있을 것이다. 마지막으로, 본 연구는 지하 물류 시스템 구축의 정책적 실효성을 검증하지 못한 한계가 있다. 이에 대하여는 시뮬레이션 기반의 정책 평가를 통해 실제 운영 상황에서 정책적 효율성과 효과를 분석함으로써 실무적 가치를 높일 수 있을 것이다. 본 연구는 친환경적인 지하 물류 시스템의 가능성을 탐색하고, 도시의 녹지 확장 및 공공 자원 효율성 제고를 통해 기후 변화 대응과 도시 재생에 기여할 수 있는 발판을 마련한 중요한 첫걸음으로 평가된다.

참고문헌

- Bing Yu, Haoteng Yin, and Zhanxing Zhu. 2018. "Spatio-Temporal Graph Convolutional Networks: A Deep Learning Framework for Traffic Forecasting" Proceedings of the 27th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI). pp.3634-3640
- Liu, H.; Galleher, J.J.; Stiff, M.T. Feasibility of Underground Pneumatic Freight Transport in New York City. In Proceedings of the ASCE Pipeline Division Specialty Congress—Pipeline Engineering and Construction—What's on the Horizon, San Diego, CA, USA, 1-4 August 2004; pp. 1085-1096.
- Shang, P.C.; Chen, Y.C.; Luo, G.L.; Guo, D.J.; Su, X.C. Using Underground Logistics System to Mitigate the Congestion of Urban Transportation Network; Clausius Scientific Press: Ottawa, ON, Canada, 2019; pp. 69-76.
- Zhang, Han, Yongbo Lv, and Jianwei Guo. 2022. "New Development Direction of Underground Logistics from the Perspective of Public Transport: A Systematic Review Based on Scientometrics" Sustainability 14, no. 6: 3179. <https://doi.org/10.3390/su14063179>
- Zheng, C.; Gu, Y.; Shen, J.; Du, M. Urban logistics delivery route planning based on a single metro line. IEEE Access 2021, 9, 50819-50830.
- 고창성, 이희정. (2007). 택배 네트워크 설계를 위한 최적화/시뮬레이션 반복기법. 대한산업공학회지, 33(2), 282-289.
- 류한별, 남대식, 박민영. (2023). 도시철도를 활용한 물류서비스의 특성별 한계효과 분석. 로지스틱스연구, 31(4), 37-50.
- 박형준, 박동주, 신성일, 이창훈, 남대식. (2013) 택배물류공동화 효과추정에 관한 연구. 대한교통학회 학술대회지,
- 이효준, 장우석, 이성진 and 김동규. (2023). 항만 물류 환경에서 다중 에이전트 강화학습 기반 최적 배차 모델링 방법. 한국정보기술학회논문지, 21(6), 1-7.
- 임혜민, 고주연, 이승일. (2013). 서울시 도시철도 역세권의 토지이용과 교통 특성을 고려한 환승역의 이용자 영향요인 분석. 서울도시연구, 14(4), 27-41.
- 조용훈, 박동주, 박형준, 박찬익, 엄인섭. (2012). 택배산업의 네트워크 최적화에 관한 연구. 국토연구, 103-120.
- 진무위, 이항숙 (2017). 지역물류단지 최적 입지선정을 위한 방법론 연구. 로지스틱스연구, 25(4), 95 - 106.
- 한국교통연구원 (2011), 지하 화물운송 시스템 기술개발 기획
- 한국교통연구원(2011), 수도권 도시물류시설 효율성 강화 방안
- 황선우, 김학성 and 김주옥. (2021). 도시지하철도 물류 시스템의 운영시나리오 분석을 통한 인터페이스 요구사항 보완 연구. 물류과학기술연구, 2(2), 38-51.
- 황재민. (2023-10-11). 지하공간을 활용한 도시철도 물류시스템 개발. 대한교통학회 학술대회지, 부산.