

I 연구 배경 및 목적

○ 최근 대한민국 택배 산업은 온라인 쇼핑과 비대면 서비스의 증가에 따라 급격히 성장하였으며, 물동량도 지속적으로 증가하여 기존 물류 인프라에 부담이 가중되고 있음. 이러한 문제를 해결하기 위해, 대한민국 정부는 기존 지하철 인프라를 활용한 도시 지하물류 시스템을 추진하고 있음

○ 본 연구의 목적은 딥러닝 기반 물동량 예측 모델과 네트워크 최적화를 통해 지하철망을 활용한 물류 네트워크의 효율성을 검증하고, 최적의 물류 거점 및 노선을 선정하여 환경적 실효성을 확인하여 향후 효율적인 지하 물류 시스템의 운영 및 정책 수립에 있어 중요한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대됨

II 연구 방법

○ 딥러닝을 활용한 물동량 예측

시계열 모델(SARIMA)과 그래프 신경망(GNN)을 결합한 하이브리드 예측 프레임워크를 구축하여 물동량의 시공간적 특성을 반영한 예측을 수행하였음

○ 지하물류시스템 네트워크분석 및 최적노선선택

$$\begin{aligned} \text{Minimize } Z &= \sum (w_d \cdot d_{ij} + w_t \cdot t_{ij} + w_h \cdot h_{ij}) \\ \sum f_{ij} &\leq c_{ij} \quad \forall (i, j) \in A \\ \sum f_{ij} - \sum f_{ji} &= b_i \quad \forall i \in N \\ f_{ij} &\geq 0 \quad \forall (i, j) \in A \end{aligned}$$

물류 흐름의 최적 경로를 도출하기 위해 다익스트라 알고리즘을 수정하여 예측된 물동량에 따른 최적 물류 네트워크를 분석하였음

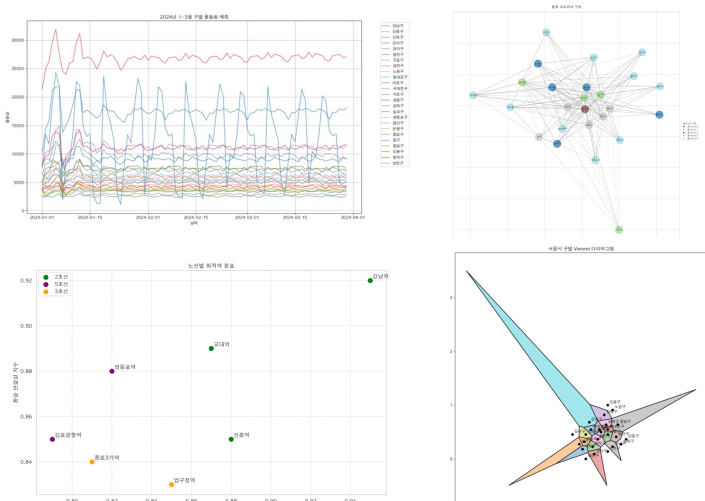
○ 서울특별시 지하물류 거점 역의 최적 선정 기준

1. 예측 물동량이 많은 구에 위치한 역
2. 단일 역이 행정동의 영향권에 위치한 경우
3. 물류 거점 역 간의 충분한 거리 확보
4. 주변 등록 인구가 많은 역
5. 환승이 가능한 역
6. 교통접근성이 양호한 역

III 연구 결과

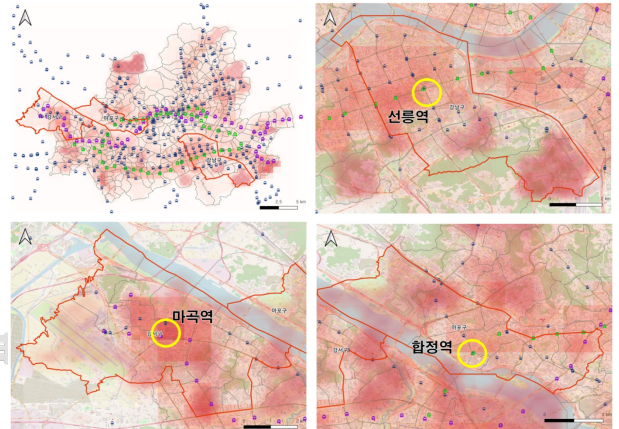
○ SARIMA와 GNN을 결합한 하이브리드 예측 프레임워크를 통해 물동량을 예측한 결과, 강남구가 연결중심성 0.923, 매개중심성 0.876을 보여 가장 높은 물동량 중심성을 보였음

○ 다익스트라 알고리즘을 통해 네트워크 최적화를 분석한 결과, 네트워크 중심성과 평균 경로 길이, 최대 처리용량을 기준으로 2호선, 5호선, 3호선이 물류 처리에 가장 효율적인 노선인 것으로 나타남



○ 시공간 커널밀도 추정(ST-KDE) 분석을 통해 선정된 노선들이 시간대별 물동량 변화에도 효과적으로 대응할 수 있는 것으로 확인됨. 특히 2호선은 첨두시간대(08:00~10:00) 92.3%의 높은 커버리지를 보였으며, 5호선과 3호선도 각각 84.5%, 81.2%로 양호한 커버리지를 기록함

○ 물동량 예측과 다익스트라 알고리즘 기반 네트워크 분석 결과를 종합하여, 강남구, 강서구, 마포구의 주요 권역을 중심으로 최적역을 선정함. 각 자치구를 지나는 2호선, 5호선, 3호선 중 물동량 처리량과 함께 우수한 환승 연결성을 가지는 역들을 선정함



○ 인구 커널밀도 계산, 교통 커널밀도 계산, 서울시 지하물류 거점 역의 최적 선정 기준에 따른 최적화 분석 결과, 2호선의 선릉역과 합정역, 5호선의 마곡역이 주요 거점으로 선정됨

○ 2호선 선릉역은 서울형 도시지하물류 시스템의 차랑기지로 고려중인 수서역과 같은 수인분당선을 공유한다는 특징을 가짐. 또한 강남구 내의 타 역들에 비해 주변 역간 거리가 넓은 편임. 향후 지하물류시스템이 확장될 경우 도심 중심의 물류 공급에 적합한 역으로 판단됨.

○ 2호선 합정역은 6호선의 환승역에 해당하고 주변에 큰 도로가 많아 교통 접근성이 양호함. 또한 등록 인구가 많아 택배 수요에 원활히 대응할 수 있는 역이라 판단됨

○ 5호선 마곡역은 환승역은 아니지만, 주변에 9호선과 공항철도 환승역인 마곡나루역이 600m 내에 위치해 있어 다른 노선으로의 환승이 용이함. 또한, 인구 및 도로 밀도가 높아 지하물류 수요가 많은 지역으로 향후 물류 허브로서의 발전 가능성이 높다고 판단됨

IV 연구 결론

○ 본 연구는 속 가능한 친환경 지하물류 시스템 구축을 위해 GNN과 SARIMA를 결합한 하이브리드 예측 프레임워크로 물동량 예측을 수행하고, 네트워크 분석과 최적화를 통해 서울시 주요 상업지역을 중심으로 최적의 물류 거점을 선정하고 효과적인 경로를 설정하였음

○ 이를 통해 CO2 감축 및 지상 교통망에 대한 부담을 줄이고 물류 이동의 효율성을 높이는 데 기여할 수 있음을 확인하였음

○ 본 연구는 도시 물류 시스템의 개선과 정책적 의사결정에 중요한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대됨

○ 향후 연구에서는 다양한 환경 변수를 추가하여 예측 모델을 고도화하고, 시뮬레이션 기반 분석을 통해 실제 운영 상황에서의 효율성을 검증이 필요함

V 참고문헌

1. Lee, H., Goh, J., & Park, M. (2021). 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, pp. 1085-1086.
2. Zhang, P., Chen, Y., & Lee, S. (2019). Using Underground Logistics System to Mitigate the Congestion of Urban Transportation Network. Elsevier ScienceDirect, Elsevier, CA, Canada, pp. 69-76.
3. Zhang, H., Yang, L., and Zhang, Z. (2022). New Development Direction of Underground Logistics from the Perspective of Public Transport: A Systematic Review Based on Scientometric, Sustainability 14, no. 6: 3179.
4. Yu, S., Huang, H., and Zhang, Z. (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.
5. Zhang, C., Du, Y., Shen, J., Du, M. (2021). Urban logistics delivery route planning based on a single metro line. IEEE