설명가능한 인공지능을 활용한 지하철 혼잡도 예측과 정책적 의사결정을 위한 비즈니스 애널리틱스

Jaeheung Parka, Kyungwon Kima,*∗*

*aSchool of International Trade and Business, Incheon National University, Incheon, 22012, Republic of Korea*

# Abstract

*Background:* 2022년 기준 하루 평균 대중 교통 이용건수는 약 1,025만 건인데, 그 중에서 약 50.3%를 차지할 정도로 서울시민 중 절반 이상이 매일 지하철을 이용한다. 교통시설이나 수단, 그리고 이용대상에 따라 관련 이론이나 방법들이 개발되고 있지만, 설명가능한 인공지능을 사용하여 혼잡도를 정교하게 예측하고 그 근거를 제시하는 연구는 거의 전무한 실정이다.

*Objective:* 본 연구에서는 승강장 내에서 시민들이 승하차 하는 과정에서 느낄 수 있는 혼잡도를 예측하는 것을 목적으로 한다. 또한 실시간으로 정확하게 혼잡도를 예측 및 설명함으로써 빅데이터 기반 비즈니스 애널리틱스 방법론을 제시하고 혼잡도 원인에 대한 대응을 효과적으로 제시한다.

*Participants and Methods:* 공공데이터포털의 8개 데이터베이스를 융합하였다. 그리고 대표적인 머신러닝 및 딥러닝 알고리즘으로 혼잡도를 예측하였으며, 설명가능한 인공지능인 SHAP 알고리즘으로 예측된 혼잡도의 근거를 실시간 효과적으로 제시하였다.

*Results:* 대표적 머신러닝 알고리즘은 Random Forest를 사용하여 95% 이상의 미래 혼잡도 예측 성능을 달성하였다. 혼잡도를 낮추기 위해서는 승하차인원을 줄이는 것이 근본적인 해결책일 수 있지만, 그 외에도 환승노선을 늘리는 사업이 확충되거나 섬식형태가 아닌 승강장 플랫폼으로 개발하는 것이 방법일 수 있다. 또한 한주의 출근이 몰리는 월요일과 화요일에 혼잡도가 높아지기 때문에 근무의 유연화 문화를 통해 혼잡도의 개선이 가능할 것으로 생각된다.

*Conclusions:* 설명가능한 인공지능을 사용한 비즈니스 애널리틱스 방법론은 실시간으로 대한민국 수도인 서울의 혼잡도를 예측할 수 있을 뿐만 아니라 선제적으로 원인을 파악하여 혼잡도를 낮추기 위한 대중교통이나 도시개발 정책에 대응하는데 도움을 줄 수 있습니다.

*Keywords:* Subway Congestion, Explainable Prediction, Machine and Deep Learning, Business Analytics

*∗*Corresponding author: thekimk.kr@gmail.com

*ORCID(s):* 0000-0001-6530-8426 (K. Kim)

# Introduction

대한민국의 수도인 서울의 지하철은 약 600여개의 역사에서 매일 약 800만명이 이용할 만큼 대표적인 교통 수단이다. 그리고 2022년 기준 하루 평균 대중 교통 이용건수는 약 1,025만 건인데, 그 중에서 약 50.3%를 차지할 정도로 서울시민 중 절반 이상이 매일 지하철을 이용한다 (Office 2023). 또한 업무중심 또는 주거중심 지역들이 많아 인구 밀집도가 높고 출퇴근 시간이나 사회적 정치적 이슈나 이벤트로 인해 특정 시간의 지하철 혼잡도가 증가하여 심각한 문제로 나타나고 있다. 실제 지하철 혼잡에 따라서 지하철내 혼잡비용 2,317억원과 열차지연으로 인한 혼잡비용 4,960억원이 발생하고 있다 (김승준 2016). 서울시는 역내 물리적 시설 확충에 치중하고 있지만, 수요가 분산되는 효과가 크지 않은 실정이다. 향후 수도권 인근 신도시의 개발이나 다양한 형태의 교통수단이 개발될 예정이지만 혼잡도 증가가 해소될 수 있을지 미리 예상하기 어렵고 모든 시간대의 혼잡도를 줄이는 것은 쉽지 않을 것으로 생각된다. 또한 최근 전세계적으로 확산되었던 코로나 바이러스 역시 사람들이 밀집되는 폐쇄적 대중교통에서 강한 전염성을 보여 지하철 이용이 크게 감소하였기 때문에, 의학적으로나 서비스적으로 혼잡도 이슈는 다양한 방향으로 확산되기 쉽다.

이러한 사회적 이슈들을 개선하기 위해서는 다수가 이용하는 대표적 교통수단인 지하철의 혼잡도를 사전에 예측하는 것은 서비스의 효율성과 그리고 시민들의 편의성과 안정성 측면에서 중요한 의미를 갖는다 (이상준 2020). 혼잡도를 높은 정확성으로 미리 예측할 수 있다면 사전에 지하철 이용 패턴 또는 승객 흐름을 예측할 수 있음을 의미하며, 결과적으로 운행 빈도, 열차 편성, 인력 배치 등 운영 전략을 효과적으로 수립할 수 있다. 그리고 도시 계획이나 지속가능한 교통 정책 기반 인프라 시스템을 구축하는데 중요 참고자료가 될 수 있다. 또한, 높은 혼잡도로 승객들의 이동이 제한 및 응급 상황 대응이 어려워지기 때문에 (이선하 et al. 2015) 사전에 예측된 혼잡도를 낮추기 위한 노력은 승객 안전성과 향상과 서비스 수익률과 직결될 수 있다.

교통상태의 혼잡을 완화하는 연구는 지속적으로 해결하려는 난제이다. 교통 시설이나 수단, 그리고 이용대상에 따라서 관련된 이론이나 방법론들이 다양하게 개발되고 있다. 이호 and 최진경 (2015)은 승강장 혼잡도를 승강장 면적 대비 승차대기인원으로 정의하였다. 이 때 승차대기인원은 열차 탑승을 위해 대기하는 인원으로 열차 출발정보와 승강장 누적진입인원을 활용하였다. 이상준 et al. (2021)은 승강장 내 승객수와 승객점유면적의 비율을 사용하여 혼잡도를 정의하였다. 승강장 내 승객이 실제 이용하는 대기 면적 개념을 제안하였으며, 승차승객 대기면적계수를 추정하였다. 승차승객 대기면적계수의 경우, 상대식 승강장은 0.291, 섬식 승강장은 0.270을 적용하여 혼잡도를 산정하였다. 이상준 (2020)은 1분 단위 승객 통행량과 승강장 통행량을 산출하고 승강장별 실용대기면적을 나누어 승강장 동적 혼잡도를 추정하였다.

관련 연구들을 종합하면, 지하철 혼잡도는 크게 세 가지로 구분될 수 있다. 첫 번째, 지하철에 탑승 후 객차 내에서 승객들이 겪는 혼잡도이다. 공공데이터포털의 “서울교통공사\_지하철혼잡도정보” 데이터베이스가 수집하는 혼잡도는 정원 대비 승차인원으로 정의하고 승차인과 좌석수가 일치할 경우 혼잡도 34%로 산정한다. 하지만 지하철 내 공간이 제한적이기 때문에 승객이 가득차기만 하면 최대 혼잡도로 반영되기 때문에 미처 탑승하지 못한 사람들의 비율과 무관하게 반영되는 단점이 있다. 둘째는 지하철 탑승을 포함하여 승객이 대기하는 공간인 승강장 내 혼잡도를 포괄한다. 단순히 객차에 승객이 가득차더라도 외부에서 대기하는 승객들의 피로도를 반영할 수 있다. 하지만 승강장의 크기나 규모가 지하철역에 따라 천차만별이기 때문에 형평성에 맞게 비교하기가 어렵고 넓은 승강장의 경우 혼잡하지 않는 것처럼 분석될 우려도 있다. 따라서 승강장의 면적 대비 혼잡도를 반영할 필요가 있고 그것이 마지막으로 살펴볼 면적 대비 승차 또는 하차하는 승객의 비율이다. 본 연구에서는 시민들이 객차 내부든 외부든 혼잡함을 느낄 수 있는 모든 경우를 반영하기 위해 면적 대비 승하차인원을 예측하는 것을 목적으로 한다.

최근엔 전통적 통계기반 모델에서 벗어나 머신러닝이나 딥러닝과 같은 인공지능 알고리즘으로 활용하여 혼잡도를 예측하려는 연구가 증가하고 있다. 김재익 (2013)은 지하철 승하차량과 주변 토지이용 현황과의 관련성을 분석하였다. 역주변의 거주인구와 주거지의 비율이 높은 경우 또는 학교부지나 상업지 비율이 높을수록 하차량이 많음을 확인하였다. 성현곤 (2017)은 과거 6년동안의 대중교통 이용데이터를 사용하여 시계열적 변동의 발생 원인을 분석하여, 인구감소에도 불구하고 철도망의 개선과 시민들의 편의성 향상에 따라 이용이 증가됨을 확인하였다. 이정훈 and 정헌영 (2018)은 통계기반 분위회귀모형을 사용해서 부산광역시의 기온, 습도, 풍속 등과 같은 기상정보와 대중교통 통행량과 밀접한 관련이 있음을 확인하였다. 그리고 김진수 (2016)는 SNS 데이터를 포함하는 접근을 시도하고 다중회귀모델을 사용하였지만 혼잡도의 예측 성능은 높지가 않았다.

장진영, 김채원, and 박민서 (2023)는 로지스틱 회귀분석을 포함하여 의사결정나무와 랜덤포레스트(Random Forest)인 대표적 머신러닝 알고리즘을 사용하여 혼잡도를 예측하였고 정확성 기준 80% 이상의 성능을 달성하였다. 해당 연구는 500m 이내 버스정류장 수, 역세권 건물 수 등 혼잡도 예측에 있어 새로운 지표를 사용했다는 점에서 의의가 있다. 이경재 et al. (2020)는 대표적인 딥러닝 알고리즘인 다층퍼셉트론을 사용하여 혼잡도를 예측하였고, 김규진 et al. (2024)은 마찬가지로 다층퍼셉트론 알고리즘을 사용하였지만 공공데이터포털, 기상자료개방포털, 열린데이터광장 등의 공공 빅데이터를 활용하여 혼잡도를 예측하였다. 시간대별 특성과 기상 조건을 고려하여 지하철역 혼잡도를 예측한 점에서 의의가 있다. 그리고 권효승 et al. (2020)은 시간 정보에 특화된 딥러닝 알고리즘인 GRU를 사용하여 지하철 구간 혼잡도를 예측하였다. 해당 연구는 혼잡도를 30분 단위로 예측하였으며 0.0431의 낮은 loss값을 달성하였다. 이는 지하철 혼잡도를 GRU 기법으로 예측 모델을 만들었다는 점에서 의의가 있다.

인공지능의 대표적 알고리즘인 머신러닝과 딥러닝은 높은 성능의 예측값을 제공하지만, 예측 근거를 사람이 이해하기 어렵다는 한계가 있다. 블랙박스와 같은 이러한 한계를 극복하고자 설명가능한 인공지능(Explainable AI, XAI)의 필요성이 높아지고 있다. 설명가능한 인공지능은 복잡한 인공지능 알고리즘의 결과를 사람이 이해 가능하도록 설명하는 방법으로 (Adadi and Berrada 2018), 사용자는 모델이 어떤 특성과 패턴을 기반으로 결정을 내렸는지 알 수 있기 때문에 신뢰성을 높일 수 있다 (천예은 et al. 2021). 또한 인간과 인공지능 간의 상호작용을 향상시키고, 다양한 분야에서 AI의 책임 있는 사용을 가능하게 한다는 점에서 그 중요성이 부각되고 있다. 본 연구에서는 설명가능한 인공지능 방법 중 대표적인 SHAP(Shapley Additive explanation) 방법을 이용하여 고성능의 지하철 혼잡도 예측의 근거를 확인하고 변수들의 기여도를 분석한다.

본 연구는 기존 선행연구와 달리 다음과 같은 5가지 항목에서 기여하고 있다. 첫째, 기존 연구들은 적은 수의 공공데이터만을 활용했지만 본 연구는 총 8개의 데이터베이스를 융합하여 공공데이터의 효용을 뒷받침할 수 있었다. 둘째, 기존 연구들이 비즈니스적으로 바로 활용되기엔 낮은 예측 성능이었지만, 본 연구에선 MSPE 기준 95% 이상의 예측 정확성을 보이며 대중교통 관계자들이 실시간으로 바로 활용할 수 있는 방법론을 달성하였다. 이러한 접근은 다양한 상황에서도 혼잡도를 효과적으로 예측함으로써 효율적인 자원 배분과 운영 계획 수립에 도움될 수 있다. 셋째, 높은 예측 성능 뿐만 아니라 설명가능한 인공지능을 활용하여 예측 결과를 보다 쉽게 이해할 수 있도록 제시하였다. 설명가능한 인공지능을 통해 예측 결정 과정과 근거를 시각적으로 제공함으로써, 실제 비즈니스와 정책의 의사결정 과정을 보다 투명하고 신뢰할 수 있게 지원한다. 넷째, 클라우드나 고성능 PC 없이도 누구나 현장에서 쉽게 사용할 수 있는 머신러닝 및 딥러닝 기반 비즈니스 애널리틱스 프레임워크를 제시하였다. 누구나 손쉽게 데이터를 학습하고 활용할 수 있도록 설계되었기에 실용성을 극대화하는 연구다.

이후의 내용은 방법론을 통해 데이터를 결합하고 전처리 하는 과정, 혼잡도 예측을 위해 사용된 머신러닝과 딥러닝 알고리즘의 소개, 그리고 예측 결과와 결론을 제시하며 마우리된다.

# Methods

* 1. *Participants and Data Preprocessing*

한국은 정보화 시대의 도래와 행정의 투명성 그리고 사회적 활용 효율성을 높이려는 노력으로 공공데이터를 수집하기 시작하였다. 이를 통해 국민들의 정보 접근성이 높아졌으며 데이터 기반 정책을 수립하고 민간에서도 창의적인 활용을 할 수 있게 되었다. 1990년대부터 대한민국 정부는 공공정보를 디지털화하려고 일부 데이터를 개방하기 시작하였으며, 2013년 “공공데이터의 제공에 관한 법률”이 제정되면서 다양한 공공데이터가 개방되었다 (행정안전부 2023). 현재는 정부뿐만 아니라 지방자치단체에서도 다양한 공공데이터를 생성 및 개방하고 있다. 향후 더욱 많은 공공데이터가 생성될 것이고 데이터 기반 의사결정이 강화될 것이기 때문에 이러한 공공데이터를 융합하여 사용하는 것이 필수적일 것이다. 따라서 본 연구에서는 지하철과 관련된 공공데이터를 사용하여 지하철 혼잡도의 예측 성능을 개선하였다.

본 연구에서는 공공 데이터 포털에서 총 6개의 공공 데이터베이스(DB)를 통합하였다(표 1). 각 데이터베이스의 수집 데이터의 기간은 2015년부터 2024년까지 다양하지만 공통적으로 추출될 수 있는 기간인 2021년부터 2023년까지 추출하였고, 데이터의 단위도 일단위로 통일하여 통합하였다.

표 1. 설명가능한 지하철 혼잡도 예측을 위한 공공데이터 정보

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **데이터베이스(DB)명** | **기간** | **단위** | **추출변수** | **종속변수활용** |
| **한국천문연구원\_특일 정보** | 전체 | 일 | 연도, 월, 일, 요일, 공휴일, 대체공휴일 | - |
| **서울교통공사\_1\_8호선 역별 일별 시간대별 승객유형별 승하차인원** | 2015.01-2024.07 | 일 | 일별 승하차인원수, 우대권인원수, 청소년인원수 | 승강장혼잡도 |
| **서울교통공사\_지하철혼잡도정보** | 2019-2024 | 분기 | 분기별 05시~23시 상하선 혼잡도(정원대비 승차인원) | - |
| **서울교통공사\_월별 환승유입인원** | 2019-2023 | 연 | 월별 환승유입인원수 | - |
| **서울교통공사\_역사운영 현황** | 2024.06.30 기준 | 연 | 역사운영현황(호선, 역명, 면적, 흥수, 승강장유형, 출입구수, 환승노선) | 승강장혼잡도 |
| **서울교통공사\_수송순위** | 2019-2023 | 연 | 연도별 수송인원수 | 상위 10개역 필터링 및 종속변수 결측치 존재역 제외 |

그리고 각 데이터베이스에서 추출할 수 있는 변수들을 생성하였고 필요에 따라서는 여러 개의 데이터베이스 변수들을 결합하여 생성하기도 하였다. 특히 종속변수인 혼잡도의 정의에 따라 여러 개의 데이터베이스를 결합하여 추출하여야 한다. 그리고 혼잡도가 낮은 경우보다 혼잡도가 높은 경우를 집중적으로 예측이 필요하기 때문에 수송인원수가 많은 상위 10개의 역을 필터링하고 종속변수로 활용하기에 결측치가 존재하는 경우를 제외하여 예측 대상역으로 선정하였다. 수집된 데이터의 양은 약 55만개의 샘플 데이터가 수집되었고 총 24개의 혼잡도 관련 변수가 추출되었다. 수집된 데이터의 지하철 노선은 1호선부터 8호선까지 중 2호선이 총 7개의 역으로 가장 많이 포함되어 있다. 본 연구에서 사용한 데이터는 본 연구에서 사용하는 종속변수는 승강장혼잡도로 “면적 대비 승하차인원”으로 정의된다. 총 약 55만개의 승강장 혼잡도의 평균값은 59.97이며 최소 0.25부터 최대 502.32까지 분포되어 있다. 그리고 승강장혼잡도를 제외한 나머지 23개의 변수들이 독립변수로 사용되어 승강장혼잡도를 예측하는 주요요인들로 활용된다.

표 1에 따르면 본 연구에서 총 6개의 공공 데이터베이스(DB)를 융합하였는데, “서울교통공사\_1\_8호선 역별 일별 시간대별 승객유형별 승하차인원” DB를 기준데이터로 사용하였다. 해당 데이터는 교통카드(선후불교통카드 및 1회용 교통카드)를 이용한 지하철 호선별 역별(1~9호선, 서울시 관할 운송기관에 한함) 시간대별 승하차인원을 나타내는 정보로 수송일자, 호선명, 역명, 승하차구분, 승객유형, 시간대별 승하차인원을 알 수 있다. 여기서 변수를 가공하여 시간대별 승하차인원의 합과 차, 시간대별 우대권인원수, 시간대별 청소년인원수 변수를 추가하였다. “서울교통공사\_지하철혼잡도정보” DB를 5시부터 23시까지 시간대별 상선 혼잡도와 하선 혼잡도로 분리하여 위 승하차인원(기준 데이터) 기준 데이터에 병합(Merge)하였다. 그 다음으로 "서울교통공사\_월별 환승유입인원" DB의 역 및 월별 환승유입인원 변수를 기준 데이터에 병합하였다. 그 후 2024년 6월 30일 기준 "서울교통공사\_역사운영 현황" DB에서 역별(호선별) 면적, 출입구, 섬식여부, 환승노선 갯수를 추출해서 기준 데이터에 병합하였다. 그리고 종속변수로 사용된 승강장혼잡도를 면적 변수와 승하차인원(합) 변수를 사용하여 생성하였다. 그 외에 역별 및 시간대별, 상행\_평균운행간격, 하행\_평균운행간격, 상행\_운행횟수, 하행\_운행횟수 변수를 생성하였다. 마지막으로 날짜 정보의 경우, 위 데이터에서 수송일자를 활용하여 년도, 월, 일, 요일, 주 변수를 만들었고, holidayskr 라이브러리를 통해 공휴일 변수를 생성할 수 있었다.

생성된 공공빅데이터 기반 융합DB에서 종속변수를 예측하기 위해 나머지 23개의 독립변수들을 사용하여 모델링 할 때 알고리즘이 이해할 수 있는 형태로 전처리 후 반영해야 한다. 전처리 과정에서 불필요한 변수들을 삭제하기도 하고 문자로 된 응답값은 별도의 변수나 숫자로 변환하며 최종적으로 정리된 숫자들은 응닶값의 범위를 맞추기 위해 특정 범위로 스케일을 맞춘다(Scaling). 마지막으로 평균적으로 역마다 약 5.49만개 정도의 samples를 8:2의 비율로 구분하여 Train and Test set으로 분리하였다. Train은 모델링을 위한 학습에 사용되고 모델의 hyperparameters를 결정하기 위해 MSE가 최대가 되는 방향으로 설정하였다. 그리고 Test는 미래 데이터로 가정하여 학습된 모델이 미래에 얼마나 지하철혼잡도를 잘 예측하는지 평가하는데 사용된다. 기본적으로 지하철 혼잡도가 어떤 원인들로 설명되더라도 그 해석이 미래 고객들이 이용할 지하철의 혼잡도를 실제로 잘 예측하는 설명이어야 고객들에게도 관련 의사결정자들에게도 정책적 활용가치가 높을 것이다. 이해도를 높이기 위해 전체적인 융합 DB 생성 과정을 제시한다.

* 1. *Statistical Algorithm*

첫번째로 사용할 대표적인 regression algorithm은 linear regression이다. 이 모델은 statistical regression 알고리즘 중 하나로 전통적으로 다양한 분야에서 사용되는 기초 알고리즘이며 각 sample data에 대응되는 변수들이 종속변수에 영향을 주는 가중치가 곱해져서 예측값이 추정되는 개념이다. The basic form of this algorithm for 지하철 혼잡도 is as follows:

따라서 각 independent feature가 지하철 혼잡도에 얼마나 기여하는지 파악할 수 있지만 독립변수와 종속변수의 관계를 linear로 가정하기 때문에 정확성이 다른 머신러닝이나 딥러닝 대비 낮은 경향이 있다.

* 1. *Machine Learning Algorithm: Bagging and Boosting*

기본적으로 머신러닝 알고리즘은 예측 오차를 줄이는 방향으로 설계되었다. 오차는 bias and variance로 분리될 수 있는데, 예측의 안정성에 초점을 두어 variance를 줄이기 위해 샘플링 기법을 활용하는 Bagging과 성능에 초점을 두어 bias를 줄이기 위해 반복적인 모델링을 활용하는 Boosting으로 구분될 수 있다. Bagging은 여러 개의 샘플을 추출하여 각 샘플마다 모델링한 후 outputs의 투표로 최종 output의 label을 결정하는 방식이기에 bootstrap aggregating으로 불린다. 본 연구에 활용된 대표적 알고리즘은 Random Forest(RF)다. RF는 samples를 병렬처리로 한꺼번에 모델링 할 수 있기 때문에 속도도 빠르다며 training 데이터의 학습 성능이 우수한 편이고 noise data에도 성능이 크게 변하지 않는 robust algorithm이다 (Michie, Spiegelhalter, and Taylor 1999). 변수의 중요도를 제공하긴 하지만 각 샘플별 모델링 과정에서 각 변수들의 우선순위를 평균한 것으로 positive or negative와 같은 영향력의 방향성을 포함하지는 못하는 단점이 있다.

Bagging처럼 Boosting도 classification and regression 문제 모두 활용할 수 있는 supervised learning이다 (Chen and Guestrin 2016). Gradient boosting methods(GBM)를 기반으로 Extreme gradient boosting (XGBoost) and LightGBM, CatBoost 등의 알고리즘으로 확장되며 단점들이 개선되고 다양한 기능이 추가되었다. 본 연구에서는 XGBoost, LightGBM and CatBoost를 대표적인 boosting 알고리즘으로 활용하여 자하철 혼잡도 예측에 사용한다. 이 알고리즘들은 전체 데이터를 학습할 때 잘 학습되지 않은 에러들을 가중치를 높여 재학습을 하면서 성능을 향상시키는 방향으로 설계되었다. 메모리를 효율적으로 사용하거나 computation 속도를 높이기 위한 많은 기능들이 추가되었고, iterative learning과 병렬처리 과정에서 성능이 높아질 수 있었다 (Alsubari et al. 2021).

* 1. *Deep Learning Algorithm: MLP, CNN*

딥러닝은 인공지능의 한 방법론으로, 인간의 두뇌 구조에서 영감을 받아 개발되었다. 데이터의 복잡한 패턴들을 학습하기 위해 연속된 layer를 중첩하여 변수들의 모든 상호작용을 포함하여 의미있는 규칙들을 학습해 내는데 강점이 있다. 이러한 구조의 기본이 되는 알고리즘으로 multilayer perceptron (MLP)가 있으며, 이미지나 시계열 등의 데이터도 학습해 낼 수 있도록 layer의 구조나 흐름을 개선하여 convolutional neural network (CNN)과 recurrent neural network (RNN) 등으로 확장되었다. neural network structure를 가진 모든 알고리즘들은 앞서 소개한 머신러닝의 알고리즘 처럼 activation function만 선택적으로 변경함으로써 classification and regression 문제 모두에 활용가능한 universal approximator이다. 모델의 구조가 복잡하기에 수많은 가중치들을 한꺼번에 추정해야 하는데 feed-forward and backpropagation 을 사용하여 loss function을 최소화하기 위해 gradient descent optimizer를 사용하였다 (see Figure 2) (Viswavandya, Patel, and Sahoo 2021). 머신러닝과 마찬가지로 다양한 nonlinear patterns를 학습함으로써 기존의 알고리즘보다 성능이 대폭 향상되어 인간이 인지하기 어려운 것들도 학습해내는데 유용하다.

본 연구에서는 MLP and CNN 알고리즘을 활용하여 지하철 혼잡도를 예측한다. 특히 CNN은 이미지 분류 특화 알고리즘이지만 내부 구조가 결국 feature를 요약하여 것이기 때문에 regression 문제에도 활용이 가능하다. Feature를 요약하기 위해 convolution, pooling, and fully connected layers를 활용하여 인접한 feature values들의 관련성에 더욱 초점을 두어 학습한다. 이러한 과정에서 여러 개의 neurons로 구성된 layer들을 계속적으로 통과하는데, 결국 low-level feature vector에서 점차 high-level feature vector로 변수들의 특성이 변환되어 학습된다 (Shustanov and Yakimov 2017). 따라서 다양한 변수들의 상호작용을 포함한 특징들이 학습될 것이고 마지막 output은 지하철 혼잡도 값이 출력되며 regression 문제를 해결한다.

* 1. *Model Explainability: SHapley Additive exPlanations (SHAP)*

앞서 소개한 인공지능의 대표적인 알고리즘인 머신러닝과 딥러닝은 발생가능한 변수들의 모든 상호작용들을 스스로 생성하여 학습하기 때문에 인간의 수준을 뛰어넘는 성능 달성이 가능하게 하였다. 하지만 왜 그러한 결과가 발생한 것인지 쉽게 확인하거나 설명하기는 어려운 블랙박스 알고리즘이다. 일부 머신러닝 알고리즘이 변수들의 중요도(Feature Importance)를 출력하지만 방향성이 없기 때문에 해석에 주의를 기울여야 한다. 하지만 SHAP(Shapley Additive exPlanations)는 local interpretable model-agnostic explanations (LIME)과 shapley value를 연결한 이론으로, 이러한 블랙박스와 같은 알고리즘들의 한계를 보완하여 지하철 혼잡도 예측에 영향을 주는 변수들의 특징과 방향을 설명해준다. LIME은 주어진 데이터 값들을 변화시킬 때 모델 예측값의 변화와의 관련성을 가중치로 계산한다 (Molnar 2023). 그리고 shapley values는 coalitional game theory를 기반으로 변수들의 기여도를 계산하는 metric으로 생각할 수 있다. 따라서 변수들이 가질 수 있는 모든 coalitions 경우들을 생성한 후 실게 값들이 입력되었을 때 변화된 예측값의 기여도 평균을 계산한다. 하지만 연산량이 매우 많을 수 있기 때문에 랜덤 샘플링 기법을 활용 계산의 효율성을 높인다. 이 2가지 이론이 결합된 SHAP를 사용하여 지하철 혼잡도에 기여하는 변수들의 정도와 방향성을 알 수 있고 블랙박스와 같은 인공지능 알고리즘을 설명가능케 한다.

선형 기반의 단순한 기울기로 해석하는 전통적인 statistical algorithms는 우리가 직관적으로 이해하기는 쉽지만 샘플이 1개라도 변경되면 해석이 얼마든지 달라질 수 잇는 불안정성이 있고 실제 예측 성능도 낮아서 단순히 설명만 될 뿐 실제 비즈니스에 활용하기는 어렵고 조심해야 한다. 반면, 인공지능 알고리즘은 구조가 복잡하고 정교하지만 높은 정확성을 나타낸다. 따라서 인공지능 알고리즘을 사용하되 SHAP와 같은 설명가능한 기능들을 결합하며 설명력을 강화하기 위한 model explainability의 중요성은 점점 높아지고 있다.

* 1. *Evaluation Metrics*

지하철 혼잡도를 예측하고 설명의 신뢰성을 높이기 위해 6개의 regression metrics를 사용하여 모델링의 성능을 확인한다. 이들은 RMSE(Root Mean Squared Error), MSPE(Mean Squared Percentage Error), MAE(Mean Absolute Error), MAPE(Mean Absolute Percentage Error), MedAE(Median Absolute Error), MedAPE(Median Absolute Percentage Error)이다. 이러한 six evaluation metrics는 아래와 같이 계산된다:

모든 metrics는 예측 성능이 좋을수록 낮은 수치들이 나오도록 실제값()과 예측값()의 차이로 구성되어 있다. 따라서 6개의 metrics 모두 낮은 수치가 나오는 경우 지하철 혼잡도를 잘 예측하는 모델이라 볼 수 있다.

# Results

이번 섹션에서는 전처리 완료된 종속변수와 독립변수를 사용하여 모델에 데이터를 학습 지하철 혼잡도의 예측 결과를 제시한다. 실제 지하철 혼잡도 예측 성능이 높아야 모델이 설명하는 기여도 또는 관련성과 같은 설명 신뢰성이 확보될 수 있을 것이다. 선형회귀분석과 같은 전통적인 알고리즘을 사용하는 경우 지하철 혼잡도 예측을 위한 변수 기여는 쉽게 알 수가 있지만 실제 그러한 변수들의 설명력으로 혼잡도를 예측할 경우 성능이 낮은 경향이 있다. 전통적인 사회과학에서 설명력에 집중하느라 그러한 설명이 미래에 얼마나 비즈니스적으로 신뢰할 수 있는 결과인지는 경시하는 경향이 있다. 따라서 머신러닝과 딥러닝으로 forecasting performance 결과를 우선적으로 확인하여 모델링의 성능을 확보하고 다음으로 블랙박스와 같은 알고리즘에 SHAP 알고리즘을 적용하여 신뢰할 수 있는 변수들의 설명력을 제공한다. 데이터 준비, 전처리, 모델링, 성능 검증 등의 모든 데이터분석 프로세스는 python 3.9.20 버전을 사용하였다. 그리고 Machine Learning 알고리즘들은 sklearn 1.5.2 버전의 라이브러리를 그리고 Deep Learning 알고리즘은 tensorflow 2.17.0 버전의 라이브러리를 사용하였다. 그리고 알고리즘의 예측 성능을 설명하기 위해 사용한 SHAP는 0.46.0 버전의 라이브러리를 사용하였다.

* 1. *Prediction Performance*

이번 section에서는 지하철 혼잡도의 모델링 성능을 확인하기 위해 머신러닝 및 딥러닝 알고리즘의 미래 예측 성능을 소개한다. 예측문제를 해결하기 위한 전통적인 알고리즘인 Linear Regression, 대표적인 머신러닝 알고리즘인 Random Forest, XGBoost, LightGBM, 그리고 CatBoost를 포함하여 총 5가지 머신러닝 알고리즘을 사용하였다. 그리고 대표적인 딥러닝 알고리즘인 MLP and CNN 총 2가지 알고리즘을 사용하였다. 전체 데이터 80%의 training set을 사용하여 모델링하고 hyperparameters를 조정하였다. 그리고 20% test set을 사용하여 미래 예측 성능을 확인함으로써 모델의 성능을 확보한다. 알고리즘을 성능을 공평하게 비교하기 위해 가급적 동일한 parameter values를 사용하였다 (표 1).

표 3. 지하철 혼잡도 모델링에 사용한 알고리즘의 하이퍼파라미터

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Algorithm** | **Parameter** | **Value** |
| **Logistic Regression** | Intercept | TRUE |
| Max Iteration | 100 |
| Random State | 0 |
| **Random Forest**  **XGBoost**  **LightGBM**  **CatBoost** | Samples | 100 |
| Criterion | Gini |
| Minimum Spitting Samples | 2 |
| Random State | 0 |
| **MLP** | TensorFlow Random Seed | 0 |
| Number of Hidden Layers | 2 |
| Unit Numbers for Hidden Layers | (100, 100) |
| Activation for Hidden Layers | Relu |
| Activation for Output Layer | identity |
| Loss | Mean Squared Error |
| Optimizer | Adam |
| Epochs | 500 |
| **CNN** | TensorFlow Random Seed | 0 |
| Number of Convolution Layers | 1 |
| Unit Numbers for Convolution Layers | 64 |
| Number of Dense Layers | 2 |
| Kernel Size | 2 |
| Stride | 1 |
| Padding | Valid |
| Unit Numbers for Dense Layers | 64 |
| Activation for Hidden Layers | Relu |
| Activation for Output Layer | Linear |
| Loss | Mean Squared Error |
| Learning Rate | 0.001 |
| Optimizer | Adam |
| Batch Size | 32 |
| Epochs | 10 |

알고리즘에 데이터를 학습시킨 후, 지하철 혼잡도의 Test 예측 성능을 검증한다. 각 역마다의 모든 알고리즘의 검증지표 순위를 추정한 후 10개역의 순위 평균치(표 4)와 각 알고리즘마다 10개역의 검증지표 평균값(표 5)를 통해 보다 일반화된 알고리즘의 설명이 가능하다. 표 4를 보면 RMSE의 경우 MLP 알고리즘이 10개역 평균 순위가 1.38로 나타난다. 즉, 대부분의 경우에서 RMSE 지표는 MLP 알고리즘의 지하철 혼잡도 예측 순위가 1등으로 나타남을 의미한다. 그런데 RMSE를 제외한 나머지 5개 검증지표들에서는 Random Forest 알고리즘이 10개역 평균 순위가 1.08와 1.00으로 나타났다. 따라서 나머지 검증지표들에선 Random Forest 알고리즘이 거의 항상 1등을 했다는 것이다. 따라서 6개의 검증지표들 중 5개의 검증지표에서 상위순위를 차지한 알고리즘은 Random Forest다. 그리고 다음 순위를 차지한 알고리즘은 MLP다. 실제 알고리즘별로 10개역의 검증지표 수치를 평균해 보았더니(표 5), 1순위를 차지한 Random Forest 알고리즘이 평균치 기준인 MSPE에서 5.01%, MAPE에서 5.32%를 차지할만큼 10% 미만의 오차를 보이며 정확하게 지하철 혼잡도를 예측하는 것으로 나타났다. 2순위를 차지한 MLP의 경우도 MSPE와 MAPE가 각각 7.17%와 8.24%를 나타낼 정도로 높은 정확도를 보이고 있다. 반면 전통적인 선형회귀분석 알고리즘은 순위에서도 최하위이며 실제 예측 오류는 MSPE가 217% 만큼 매우 부정확한 예측임을 알 수 있다. 따라서 이러한 정확도를 보이는 모델링에서 변수들의 기여도 또는 설명력을 신뢰하는 것도 어렵다고 판단된다. 따라서 지하철 혼잡도 예측에 사용한 공공데이터의 독립변수 패턴은 단순히 선형회귀분석에서 잘 학습될 만큼 선형(Linear)패턴이 아니고 훨씬 복잡한 비선형(Non-linear) 패턴이 많이 포함되어 있음을 의미하고, 고성능의 PC 성능을 요구하는 고성능 딥러닝 알고리즘이 아니더라도 정교하고 높은 예측 모델링을 구축할 수 있음을 의미한다.

표 4. 수송인원수 상위 10개 역의 미래 예측 성능 검증지표 순위 평균

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Algorithm** | **RMSE** | **MSPE** | **MAE** | **MAPE** | **MedAE** | **MedAPE** |
| **Linear Regression** | 7.00 | 7.00 | 7.00 | 7.00 | 7.00 | 7.00 |
| **Random Forest** | 1.92 | 1.92 | **1.00** | **1.08** | **1.00** | **1.00** |
| **XGBoost** | 4.54 | 4.54 | 4.46 | 4.46 | 4.46 | 4.46 |
| **LightGBM** | 4.54 | 4.54 | 4.69 | 4.62 | 4.54 | 4.62 |
| **CatBoost** | 5.92 | 5.92 | 5.85 | 5.92 | 6.00 | 5.92 |
| **MLP** | **1.38** | **1.38** | 2.54 | 1.92 | 2.31 | 2.08 |
| **CNN** | 2.69 | 2.69 | 2.46 | 3.00 | 2.69 | 2.92 |

표 5. 알고리즘별 수송인원수 상위 10개 역의 미래 예측 성능 검증지표들 중 퍼센트 오차 평균

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Ranking** | **MSPE** | **MAPE** | **MedAPE** |
| **Random Forest** | 5.01% | 5.32% | 17.34% |
| **MLP** | 7.17% | 8.24% | 59.44% |
| **CNN** | 8.13% | 9.37% | 75.27% |
| **XGBoost** | 9.91% | 14.34% | 341.08% |
| **LightGBM** | 10.22% | 14.37% | 347.00% |
| **CatBoost** | 13.10% | 17.66% | 482.05% |
| **Linear Regression** | 217.66% | 53.74% | 2872.37% |

* 1. *Explainability of 지하철 혼잡도 Prediction*

머신러닝 그리고 딥러닝과 같은 인공지능 알고리즘은 복잡한 비선형 패턴과 변수들의 모든 상호작용 조합까지도 학습을 하여 모델을 만들기 때문에 전통적인 linear regression과 달리 예측에 기여하는 독립변수들의 기여도를 단순하게 파악하기 어렵다. 물론 일부 머신러닝 알고리즘은 딥러닝과 달리 데이터의 학습 과정에서 예측 성능을 높이는데 기여한 feature importance를 제시하긴 하지만 순위들을 단순하게 누적할 뿐 positive or negative effect와 같은 방향성조차 제시하지 못한다. 하지만 SHAP explainer를 사용하면 지하철 혼잡도의 높은 미래 예측 성능이 왜 그러한지 독립변수들의 상대적 기여도로 평가할 수 있다. SHAP는 독립변수들의 수치들만 수집되면 실시간으로 지하철의 혼잡도가 얼마가 될 것인지 높은 성능으로 예측해 낼 수 있다. 뿐만 아니라 독립변수들이 어떠한 방향으로 기여해서 그러한 높은 미래 예측 성능을 달성하였는지 설명해주기 때문에, 실제 지하철 교통 비즈니스에 활용되기도 용이하고 신뢰성도 높아 의사결정에 용이하게 활용될 수 있다. 그리고 이러한 실시간 혼잡도처럼 누적된 혼잡도 예측과 설명력들을 모두 결합하여 일반화된 정책으로 활용할 수 있는 높은 설명력을 시각적으로 표현하기 때문에 이해하기 쉽다.

우선 실시간 지하철 혼잡도에 대한 설명력을 decision plot으로 시각화 할 수 있다. 가장 높은 성능을 보이는 Random Forest 알고리즘을 기준으로, 그림 4는 미래 특정일을 임의로 선택하여 미래 강남역 혼잡도를 예측하고 어떻게 혼잡도 수치가 나오게 되었는지 변수들의 기여도를 내림차순으로 보여준다. 예를 들어 강남역의 혼잡도가 높을 때 약 105점 정도로 예측되었는데 “하차인원, 출입구, 수송인원수, 환승노선\_개수, 청소년인원수” 등은 예측 혼잡도를 높이는 변수들이고 “승차인원, 섬식여부, 년도” 등은 예측 혼잡도를 낮추는 변수들이다. 그외 나머지 변수들은 혼잡도에 크게 기여하지 못하는 모습이다. 하지만 강남역 혼잡도가 낮을 때에 “승차인원, 하차인원, 수송인원수, 환승노선\_개수, 출입구” 등은 오히려 혼잡도를 낮추는 변수로 작용되기도 한다. 그리고 “섬식여부”도 반대로 혼잡도를 높이는데 기여하고 있다. 미래 특정일과 상황에 따라 변수들이 혼잡도를 높이거나 낮추는데 기여하는 정도나 방향은 얼마든지 달라질 수 있었다. 이러한 과정에서 실시간으로 높은 정확도의 혼잡도를 예측할 뿐만 아니라 어떻게 그러한 수치가 나오게 되는지 의사결정 근거로 활용하기에도 매우 용이하다.

|  |  |
| --- | --- |
| (a) 강남역 혼잡도 높을 때 | (b) 강남역 혼잡도 낮을 때 |

그림 7. 미래 특정 일 대상 강남역의 혼잡도 예측과 변수영향 설명력 기반 의사결정

특정일의 지하철 혼잡도에 대한 변수들의 기여를 확인하였다. 각 변수가 지하철 혼잡도에 일반화된 기여 방향을 보장하지도 않는다. 그러한 이유로 특정 변수가 지하철 혼잡도에 어떠한 방향성을 가지는지 일반화하는 것은 다소 위험할 수 있다. 정책적 근거를 위해 일시적으로 사용할 수는 있겠지만 정책 입안자들 또는 시민들에게 납득될만한 정보로 실시간으로 와닿기 어렵기 때문이다. 그렇다고 정책적 근거로 사용하지 말자는 것은 아니며, 높은 정확성의 실시간 혼잡도의 예측 설명력을 확인할 수 있었으니 이를 누적하여 표현한다면 충분히 일반화된 인싸이트로 재표현 할 수 있을 것이다. 단, 기여방향을 긍부정과 같은 이분법적인 해석은 매우 조심해야 함을 위의 실시간 예측 결과를 통해 다시 한번 강조한다. 실제 독립변수와 종속변수의 관계가 이분법적 설명으로 명확할 정도로 선형적 관계이지도 않다. 만약 선형적 관계라면 선형회귀분석의 결과가 성능이 좋아야 하는데 전혀 그렇지도 않았기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 매우 명확한 관계성이 나타나는 변수에 대해서만 조심스럽게 해석을 제안하면서 머신러닝 딥러닝 기반의 설명가능한 인공지능의 효과적인 활용법을 가이드 하는데 집중할 것이다.

각 샘플마다의 지하철 혼잡도 예측 설명력을 누적하여 일반화된 설명력을 확인할 것이다. 단, 본 연구에 활용한 샘플 수 기준의 일반화이기 때문에 샘플이 늘어나가나 줄어들 경우 변경될 수도 있음을 인지해야 한다. 아마도 데이터의 샘플이 매우 커진다면 향후 그 일반화 설명력을 더욱 신뢰할 수 있을 것임은 분명하다. 그림 5는 Random Forest 알고리즘으로 모든 미래 데이터의 지하철 혼잡도 예측을 위한 feature impacts를 시각화 한 것이다. 우선 세로축은 왼쪽과 오른쪽으로 2개가 있다. (왼쪽)세로축은 종속변수에 영향을 주는 feature importance를 내림차순으로 정렬한 것이기 때문에 높은 곳에 위치한 변수들은 낮은 곳에 위치한 변수들보다 지하철 혼잡도 예측에 더욱 많이 기여한다. 즉, “하차인원, 승차인원, 출입구, 환승노선\_개수, 수송인원수” 등의 순서로 예측 성능의 변수 기여도가 분석되었다. 그리고 (오른쪽)세로축은 변수들의 값이 낮은 경우는 파란색 계열로 그리고 높은 경우는 빨간색 계열로 표시하여 변수들의 값의 변화를 표시하였다. 마지막으로 가로축에 바로 지하철 혼잡도의 예측값을 표시하여 변수의 값의 변화에 따라 낮은 혼잡도(음수)에서 높은 혼잡도(양수)로의 예측값 변화를 이해할 수 있다. 각 시점마다 변수의 수치는 다양할 수 있고 각 수치별 지하철 혼잡도 or feature impact 방향도 다양할 수 있기 때문에, 각 변수들의 값과 대응되는 예측값 위치를 모두 누적하여 표현하면 각 변수의 값의 변화에 따른 지하철 혼잡도 기여 방향이 시각화 되는 것이다.

예를 들어 “하차인원과 승차인원”는 값이 작을때(파란색계열) 혼잡도가 낮게 예측되는 경향이 있고 값이 커지면(빨간색계열) 혼잡도가 높게 예측되는 경향이 있다. 따라서 해당 변수의 값이 높아지면 지하철 혼잡도가 높아진다고(Positive Effect) 해석할 수 있다. 반대로 “환승노선\_개수”는 값이 커질수록 지하철 혼잡도를 찾춘다고(Negative Effect) 해석할 수 있다. 이를 정리하여 미래에 지하철 혼잡도를 높일것이라 예측되는 가장 중요한 변수는 "하차인원, 승차인원, 출입구, 섬식여부, 월요일, 화요일” 등이며, 혼잡도를 낮출것이라 예측되는 변수는 "환승노선\_개수, 환승유입인원수, 하선/상선 혼잡도, 주, 년도, 월, 일요일, 목요일, 수요일" 등으로 해석할 수 있다. 단순히 지하철 관련 변수들 뿐만 아니라 시간정보에 따른 혼잡도 기여도 확인할 수 있다. 나머지 변수들도 유사한 해석을 할 수 있지만 값의 변화와 기여방향이 명확한 경우만 정책적인 근거로 활용하길 추천한다. 그렇지 않고 억지로 일반화 하는 것은 왜곡된 해석을 줄 수 있으니 지양하는 것이 좋다.

|  |  |
| --- | --- |
| (a) 우선순위 1-12 | (b) 우선순위 13-23 |

그림 8. 지하철 혼잡도 예측에 대한 변수들의 기여 설명력 기반 의사결정

# Conclusions

최근 전세계적으로 확산되었던 코로나 바이러스 역시 사람들이 밀집되는 폐쇄적 대중교통에서 강한 전염성을 보여 지하철 이용이 크게 감소하였기 때문에, 의학적으로나 서비스적으로 혼잡도 이슈는 다양한 방향으로 확산되기 쉽다. 사회적 이슈들을 개선하기 위해서는 다수가 이용하는 대표적 교통수단인 지하철의 혼잡도를 사전에 예측하는 것은 서비스의 효율성과 그리고 시민들의 편의성과 안정성 측면에서 중요한 의미를 갖는다.

본 연구에서는 승강장 내에서 시민들이 승하차 하는 과정에서 느낄 수 있는 혼잡도를 예측하는 것을 목적으로 한다. 총 8개의 데이터베이스를 결합하고 설명가능한 인공지능을 활용하여, MSPE 기준 95% 이상의 높은 혼잡도 예측이 가능하였다. 그리고 예측 결정 과정과 근거를 시각적으로 제공함으로써 실시간으로 비즈니스에 활용할 수 있을 뿐 아니라 의사결정 과정을 보다 투명하고 신뢰할 수 있도록 기여하는 비즈니스 애널리틱스를 제시하였다. 혼잡도를 낮추기 위해서는 승하차인원을 줄이는 것이 근본적인 해결책일 수 있지만, 그 외에도 환승노선을 늘리는 사업이 확충되거나 섬식형태가 아닌 승강장 플랫폼으로 개발하는 것이 방법일 수 있다. 또한 한주의 출근이 몰리는 월요일과 화요일에 혼잡도가 높아지기 때문에 근무의 유연화 문화를 통해 혼잡도의 개선이 가능할 것으로 생각된다.

본 연구는 설명가능한 인공지능을 활용하여 지하철 혼잡도를 실시간으로 빠르게 확인할 수 있는데 도움을 줄 수 있기 때문에, 서비스 측면에서 시민들에게 빠르고 효과적인 대응책을 마련하는데 도움이 될 것이다.

# Data Availability

The data can be provided on request.

# Declaration of Competing Interest

The authors declare no conflict of interest.

# CRediT authorship contribution statement

**Jaeheung Park:** Conceptualization, Software, Validation, Data Curation, Writing Original Draft, Preparation. **Kyungwon Kim:** Methodology, Preparation, Software, Writing Review and Editing, Visualization, Supervision.

# References

Adadi, A., and M. Berrada. 2018. 'Peeking Inside the Black-Box: A Survey on Explainable Artificial Intelligence (XAI)', *IEEE Access, Access, IEEE*, 6: 52138-38.

Alsubari, Saleh Nagi, Sachin N. Deshmukh, Mosleh Hmoud Al-Adhaileh, Fawaz Waselalla Alsaade, and Theyazn H. H. Aldhyani. 2021. 'Development of Integrated Neural Network Model for Identification of Fake Reviews in E-Commerce Using Multidomain Datasets', *Applied Bionics and Biomechanics*, 2021: 5522574.

Chen, Tianqi, and Carlos Guestrin. 2016. "XGBoost: A Scalable Tree Boosting System." In *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 785–94. San Francisco, California, USA: Association for Computing Machinery.

Michie, D., D. Spiegelhalter, and Charles Taylor. 1999. 'Machine Learning, Neural and Statistical Classification', *Technometrics*, 37.

Molnar, Christoph. 2023. *Interpretable machine learning. A Guide for Making Black Box Models Explainable* (Lulu. com).

Office, Seoul City Transportation. 2023. "Seoul Transportation in 2022." In, edited by Futuristic Advanced Transportation Division.

Shustanov, Alexander, and Pavel Yakimov. 2017. 'CNN Design for Real-Time Traffic Sign Recognition', *Procedia Engineering*, 201: 718-25.

Viswavandya, Meera, Shashwat Patel, and Kaushik Sahoo. 2021. 'ANALYSIS AND COMPARISON OF MACHINE LEARNING APPROACHES FOR TRANSMISSION LINE FAULT PREDICTION IN POWER SYSTEMS', *Journal of Research in Engineering and Applied Sciences*, 6: 24-31.

권효승, 최창준, 정효석, 송재인, 강민희, and 황기연. 2020. 'GRU 를 이용한 서울시 지하철 구간별 혼잡도 예측 모델 연구', *한국 ITS 학회 학술대회*: 185-90.

김규진, 박성환, 최성훈, and 김양중. 2024. '딥러닝 분석을 이용한 지하철역 혼잡도 변화의 동적 분석 및 예측 모델에 관한 연구', *한국통신학회 학술대회논문집*, 2024: 1192-93.

김승준. 2016. "서울시 지하철의 혼잡비용 산정과 정책적 활용방안." In, 1-22.

김재익. 2013. '아침 첨두시간대 지하철 이용수요의 결정요인에 관한 연구 - 대구 지하철 역세권 토지이용을 중심으로', *교통연구*, 20: 15-25.

김진수. 2016. '빅데이터 분석을 이용한 지하철 혼잡도 예측 및 추천시스템', *디지털융복합연구*, 14: 289-95.

성현곤. 2017. '서울시 대중교통 수단별 월별 이용수요의 변동에 영향을 미치는 요인 분석', *국토계획*, 52: 81-96.

이경재, 김수재, 문형택, 한재윤, and 추상호. 2020. '심층신경망 모형을 활용한 대중교통 이용자의 환승시간 추정에 관한 연구', *한국ITS학회논문지*, 19: 32-43.

이상준, 신성일, 이성희, and 윤성진. 2021. '승객 승하차 이동 및 대기행태를 고려한 도시철도 승강장 점유면적 추정방안', *대한교통학회지*, 39: 721-35.

이상준, 신성일. 2020. '교통카드 자료를 활용한 지하철 혼잡도 개선 연구 : Early Bird 정책대안을 중심으로', *한국IT서비스학회지*, 19: 125-38.

이선하, 천춘근, 정병두, 유병영, and 김은지. 2015. '철도 이용객 정보제공 효과평가 방법론 연구 -승강장의 혼잡상황을 고려한 Gate Metering 사례 연구 중심으로', *한국ITS학회 논문지*, 14: 50-62.

이정훈, and 정헌영. 2018. '분위 회귀를 활용한 기상조건이 대중교통 수단별 통행량에미치는 영향에 대한 연구', *국토계획*, 53: 95-106.

이호, and 최진경. 2015. '대중교통카드 자료를 활용한 도시철도 승강장 혼잡도 추정 알고리즘 개발', *한국철도학회논문집*, 18: 270-77.

장진영, 김채원, and 박민서. 2023. '머신러닝 기반 2호선 출퇴근 시간대 지하철 역사 내 혼잡도 예측', *문화기술의 융합*, 9: 145-50.

천예은, 김세빈, 이자윤, and 우지환. 2021. '설명 가능한 AI 기술을 활용한 신용평가 모형에 대한 연구', *한국데이터정보과학회지*, 32: 283-95.

행정안전부. 2023. "공공데이터의 제공 및 이용 활성화에 관한 법률 ( 약칭: 공공데이터법 )." In, edited by 공공데이터정책과. 법제처 국가법령정보센터.