

진입교통량 시간대별 최적관리 시 한양도성 최대 7% 소통 증가 가능

서울시, 교통수요와 관련된 문제 해결 위해 더 적극적 방안 마련할 시점

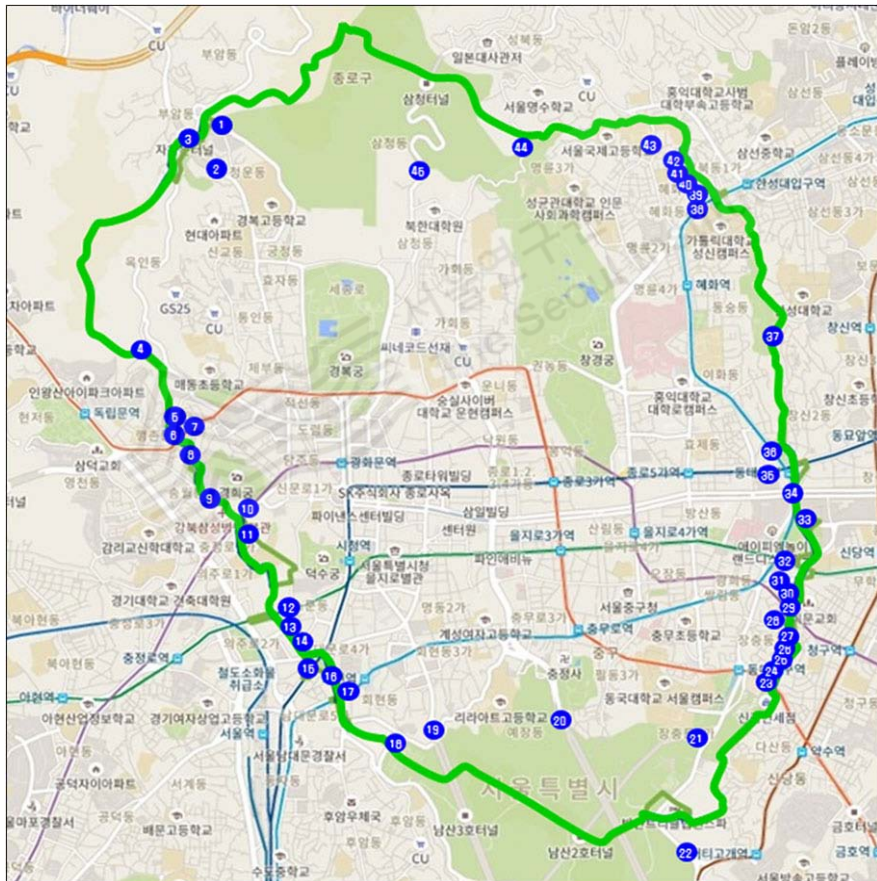
도심 내부의 과도한 교통 수요와 지역적 수요 편차로 인해 다수의 대도시는 교통 혼잡, 대기 오염, 주차 공간 부족 등과 같은 문제를 겪고 있다. 이를 해결하기 위해 대도시권에서는 주로 도로 공간 재편, 대중교통으로의 수단 전환 유도, 주차관리 등 교통수요관리를 시행하고 있다. 서울시는 1990년대부터 교통유발부담금, 기업체 교통수요관리, 남산 터널 혼잡통행료 징수, 교통량 감축 프로그램, 주차상한제, 녹색교통지역 운행제한 등의 직간접적인 교통수요관리 정책을 시행하고 있지만, 교통 관리 정책의 목표를 효과적으로 달성하기 위해서는 더 적극적인 방안을 마련할 필요가 있다.

통행정보 수집·교통관리기술 발달에 따라 능동교통관리 구현 사례 늘어나

능동교통관리는 기존 교통수요관리에 실시간성을 부여하여 지속적인 교통 상황 모니터링과 교통 상태 예측 방법론을 통해 교통 시스템에 관한 적극적 관리를 시행하는 방식으로, 2010년대에 처음으로 등장한 개념이다. 최근 실시간 통행 정보 수집 및 교통 관리 기술이 발달함에 따라 개념적 대상이었던 능동교통관리가 실제로 구현되는 사례가 증가하고 있으며, 적응형 신호 감응 통제나 동적 주차 예약 등의 관리 기법들은 국내에서도 적용된 바 있다. 능동교통관리의 목적은 신규 도로 시설의 추가 건설을 최소화하면서 기존 도로기반시설의 이용을 효율화하여 교통 혼잡을 완화하는 것으로 기존의 교통수요관리와 목적은 같지만, 실시간 교통 상태를 기반으로 상황에 맞는 전략을 적용해 효율을 극대화한다는 차별점이 있다.

진출입 자료가 수집된 한양도성 대상 능동교통관리 도입효과 분석 수행

2019년 12월 1일부터 한양도성 녹색교통지역 내 배출가스 5등급 차량의 운행이 제한됨에 따라 위반 차량 단속을 위해 한양도성에 진출입하는 모든 차량의 정보가 자동차 통행관리시스템을 통해 수집되기 시작하였다. 녹색교통지역 경계도로를 따라 45개 지점에 총 119대의 현장단속카메라를 설치하여 진출입 차량 전수 자료를 수집 중이다(그림 1). 이렇게 수집된 진출입 교통량과 내부 소통 데이터를 활용하면 능동교통관리 정책 모형을 구축하고 교통 관리 시나리오에 따른 효과 분석을 수행할 수 있다. 이에 한양도성을 연구 대상으로 선정하여 능동교통관리 기법(Active Transportation and Demand Management, ATDM)에 대한 연구를 수행하였다.

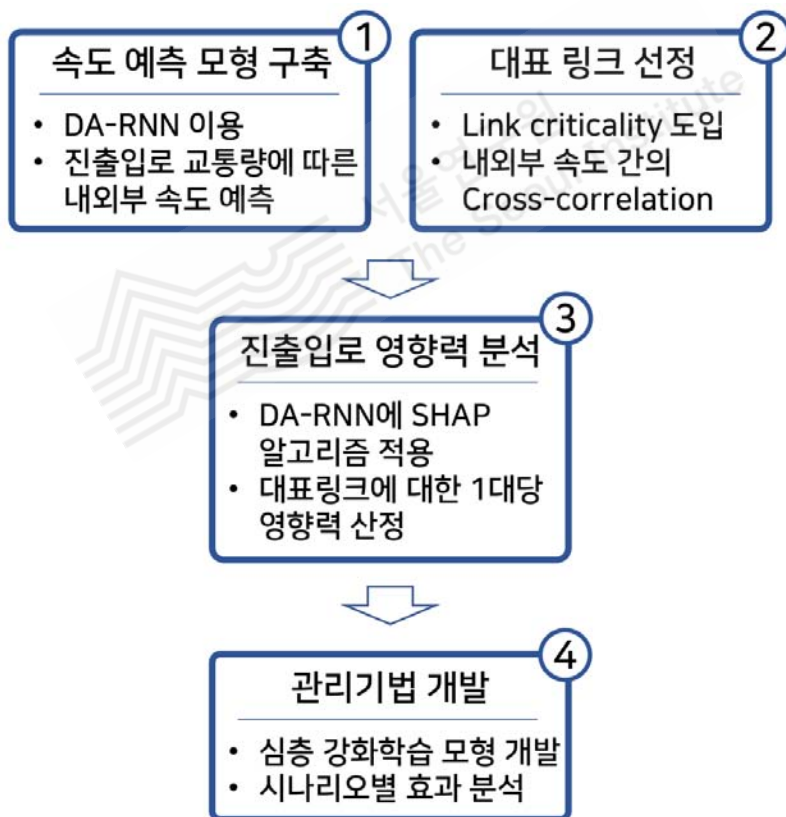


자료: 서울특별시 홈페이지, <https://news.seoul.go.kr/traffic/greentraffic>

[그림 1] 녹색교통지역 자동차통행관리시스템 차량번호인식장치(ANPR) 설치 지점 개황도

ATDM 구현하려면 링크 통행속도 예측모형·관리전략 선택모형 활용해야

ATDM은 지속적인 교통 상황 모니터링과 교통 상태 예측 방법론을 통해 실시간으로 교통 시스템과 수요에 관한 관리를 시행하는 방식으로, 진입교통량 관리에 따른 링크 소통상태 개선 효과를 예측하고 확인하기 위해선 링크 통행속도 예측 모형과 예측 결과에 따른 관리전략 선택 모형이 필요하다. 한양도성 진입교통량 관리의 대상 지점 선정을 위해 진입교통량을 통한 속도 예측 모형 구축과 동시에 Link criticality 개념을 도입하여 한양도성 내외부 대표 링크를 선정하고, 해당 대표 링크의 통행속도에 대한 진입 차량의 영향력을 지점별로 분석하였다. 교통량 관리 기법은 심층강화학습을 이용해 개발하였다. 더욱 높은 효과를 위해 영향력을 활용한 관리 시나리오를 구축하여 시나리오별 효과 분석을 수행하여 시간대별 최적 관리 기법을 제안하였다.



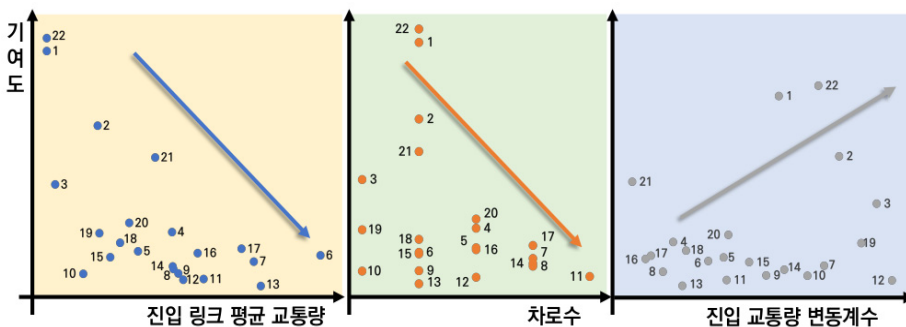
[그림 2] 연구 전체 구조 및 흐름도

인공신경망 DA-RNN 이용해 진출입교통량으로 도로 통행속도 예측 수행

Attention 메커니즘 기반의 인공신경망인 DA-RNN(Dual Attention Recurrent Neural Network)은 순차적인 데이터 예측에 특화된 인공신경망 알고리즘으로, 해당 기법을 이용하여 진입교통량에 따른 링크 속도 예측 모형을 구축하였다. 모형 구축 결과, MAE(Mean Absolute Error) 기준으로 한양도성 내부 도로 대표 링크 20개에 대해 평균 2.37km/h의 오차를 기록했고, 대표 링크를 포함한 내부 도로 전체 링크 301개에 대해서는 평균 3.27km/h의 오차가 나타났다. 한양도성 내부 지역의 경우 개별 링크에 따른 정확도의 편차가 외부에 비해 크며, 이는 도로 링크의 길이가 짧고 교통량이 많은 것에 기인한 것으로 추정된다.

진입지점 교통량 도로속도 기여도, 교통량·차로수가 적을수록 큰 경향성

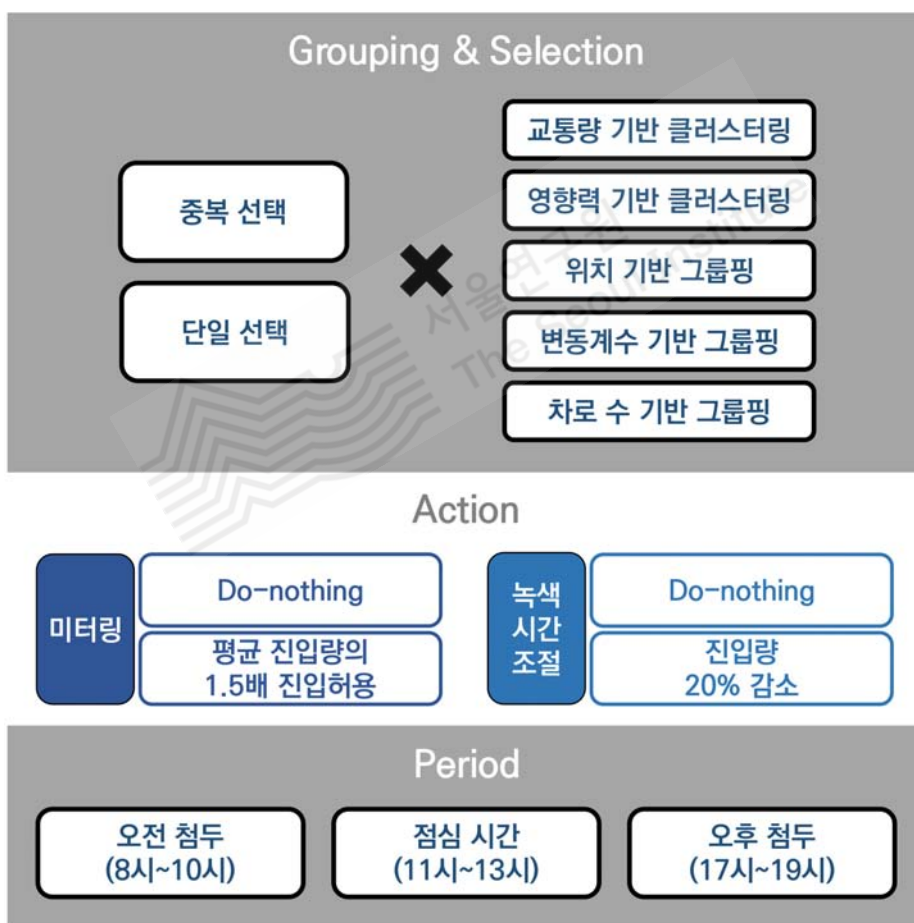
앞서 구축한 진입교통량에 따른 도로 링크 속도 예측 모형의 해석을 위해 SHAP (SHapley Additive exPlanation) 알고리즘을 사용하였다. SHAP 분석으로 어떤 지점의 진입교통량이 도로 링크의 속도에 얼마만큼의 기여도를 보이는지를 정량적으로 분석할 수 있고, 회귀분석으로 특정 진입 지점에서 1대의 차량이 통과할 때 특정 링크의 속도에 미치는 평균적인 1대당 기여도를 알 수 있으며, 여기에 교통량을 곱하면 대표 링크에 대한 진입로의 영향력을 파악할 수 있다. 22개 대표 진입 지점과 20개 한양도성 내부 대표 링크를 대상으로 분석한 결과, 진입 지점의 교통량과 차로 수가 적을수록, 교통량 변동계수가 클수록 1대당 기여도가 큰 경향성을 보였다.



[그림 3] 청계천로(청계2가~청계3가) SHAP 분석 결과 각 지점 특성에 따른 기여도 변화

최적화된 교통량 관리정책 도출할 목적으로 강화학습 모형 구축해 활용

최적화된 교통량 관리 정책을 찾기 위해 현재의 상태에서 운영자가 어떠한 행동을 취해야 하는지를 학습하는 모형인 강화학습을 활용하였다. 교통량 관리에 따른 우회 차량과 대기 차량의 패널티를 반영하기 위해 속도를 차로 수에 대해 가중평균하고 우회 시간을 고려한 속도환산점수(speed equivalent score)를 정의하여 여러 시나리오에 따른 점수 개선 정도를 강화학습의 보상점수로 활용하였다. 운영자가 취할 수 있는 정책적 행동으로는 진입교통량 기반 미터링과 신호 녹색 시간 조절을 통한 진입교통량 비율 통제가 있다. 22개 진입 지점에 대표 링크 영향력을 포함한 5가지 선택 기준을 부여하고 매 5분마다 그룹을 선택하여 통제할 수 있도록 모형을 구성하였다.

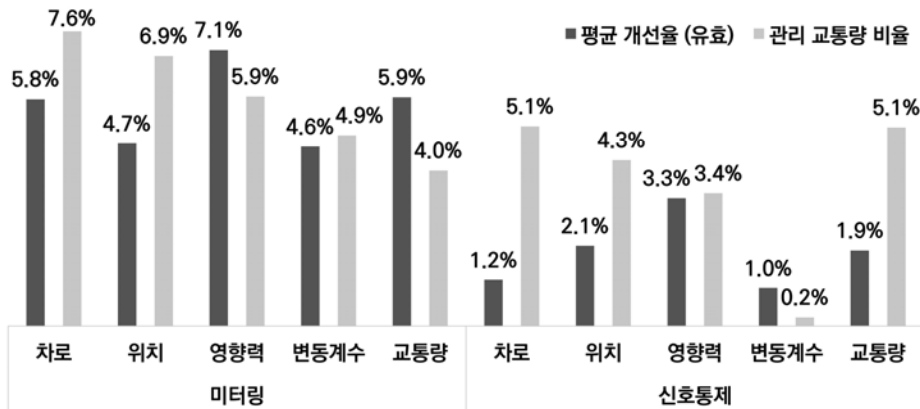


[그림 4] 교통량 관리 시나리오

진입교통량 관리로 최대 7% 소통 증가 효과 ... 오전 첨두시가 개선을 1위

영향력 기반 클러스터링으로 그룹을 구성하였을 때 오전 첨두시에 가장 좋은 결과가 나왔다. 점심 시간대나 오후 첨두시보다 오전 첨두시의 결과가 더 좋게 나왔는데, 오전에는 진입교통량의 비율이 높은 상황이라 진입교통량 관리가 내부 소통을 원활하게 하는 데 중요한 역할을 수행한 것으로 판단된다. 특히 영향력 기반 클러스터링으로 그룹을 구성하게 되면 대표링크에 대해 더욱 좋은 효과를 나타냈다. 점심 시간대의 경우 선택 전략과 관계없이 개선율이 매우 낮게 나타났다. 특히 관리에 영향을 받는 교통량 비율에 비해 평균 개선율이 매우 낮아 점심 시간대의 소통 관리에 어려움이 있다는 것을 알 수 있었다. 이는 점심 시간대의 경우 진출입 교통량보다는 내부 교통량이 내부 소통 상황에 주는 영향력이 더 큰 것으로 추측할 수 있다. 오후 첨두시의 경우 진입교통량보다 진출교통량의 비율이 높기 때문에 진입교통량 관리의 효과가 오전보다 낮게 나타났다. 모든 시간대에서 신호의 녹색 시간을 조절하는 관리 기법은 미터링에 비해 효과가 적은 것으로 나타났다.

이 연구의 분석 결과를 바탕으로 서울시 통행 소통 향상을 위한 ATDM 도입 방향을 제안한다면, 분석 대상이었던 한양도성 지역의 경우 아직 용량 한계보다는 지역적 불균형이 있는 것으로 볼 수 있기 때문에 혼잡통행료 등 전체적인 수요를 낮추는 것보다 지역적 불균형을 해소할 수 있는 방안을 위주로 고려할 필요가 있다. 또한, 정체 현상은 주로 동서축을 따라 집중적으로 발생하므로, 여기에 대한 진·출입 관리만으로도 어느 정도의 소통 개선을 기대할 수 있는 상황이다. 특히 오전 시간대에 진입관리를 통한 소통 개선이 용이하다고 볼 수 있다. ATDM 전략을 구성할 때 시간대 등에 따라 바뀌는 통행 특성을 고려하여 적절한 통행 관리 방향을 설정해야 하고, 다른 링크들과의 상관관계가 높은 주요 링크를 선정한 뒤 해당 링크를 대상으로 관리 전략을 수립한다면 통제 교통량에 비해 좋은 효과를 기대할 수 있을 것이다.



[그림 5] 오전 첨두시 중복 선택 시나리오 결과

디지털 트윈 교통시스템 구축 시 차량거동 ‘더 촘촘한 예측’ 가능 기대

이 연구로 서울시 ATDM 도입의 기초적 근거를 마련할 수 있었지만, 연구의 한계점도 존재한다. 가장 먼저 한양도성의 지역 폐곡선의 크기가 매우 크기 때문에 진·출입 교통량의 공간적인 영향력에 제약이 있어 간접적인 관리 형태로 수행된 것이 있다. 또한 개별 차량의 움직임을 시뮬레이션을 통해 구현하지 않고 데이터만을 기반으로 예측과 진입 관리를 수행하다 보니 대기하거나 우회하는 차량의 거동을 적절하게 반영하지 못한 것 역시 중요한 한계점이다. 마지막으로 연구 주제에 특화된 모형이 아닌 범용적인 심층강화학습(DQN)모형을 이용하여 작업을 수행하였기 때문에 향후 더 적합한 모형이 개발되고 해당 모형을 적용하여 분석을 수행한다면 보다 정확한 결과를 도출할 수 있을 것으로 기대한다.

도로상에 존재하는 실시간 감지 센서 및 이를 반영할 수 있는 피딩 시스템을 기반으로 수집된 데이터를 즉각적으로 업데이트하여 현실을 반영한 디지털 트윈 교통 시스템을 구축한다면 좀 더 정확히 차량의 거동을 예측하여 도시의 교통 상태, 통합 관리 서비스 등을 최적화할 수 있을 것으로 기대된다.