

도시교통 브레인 R&D 추진현황

- 1 개요
- 2 클라우드 엣지 테스트베드 구축
- 3 교통상황 분석 및 예측
- 4 교통 데이터 구축
- 5 교통 시뮬레이션 확장 개발
- 6 교통신호 최적화 및 실증
- 7 향후 추진 계획

□ 사업 개요

- 사업명: 클라우드 엣지 기반 도시교통 브레인 핵심기술 개발
- 기간/정부출연금: 2020.4.1~2023.12.31(45개월)/ 총106억
- 참여기관: ETRI, KAIST, (주)이노그리드, 렉스젠(주), 네이버시스템(주), (주)모두텍, 대전광역시, 세종특별자치시
- 최종목표: 도시의 교통소통 최적화를 위해, 클라우드-엣지 기반 실시간 교통상황 분석 및 대규모 교통 시뮬레이션 분산처리를 통한 교통제어 지능을 제공하는 도시교통 브레인 시스템 개발

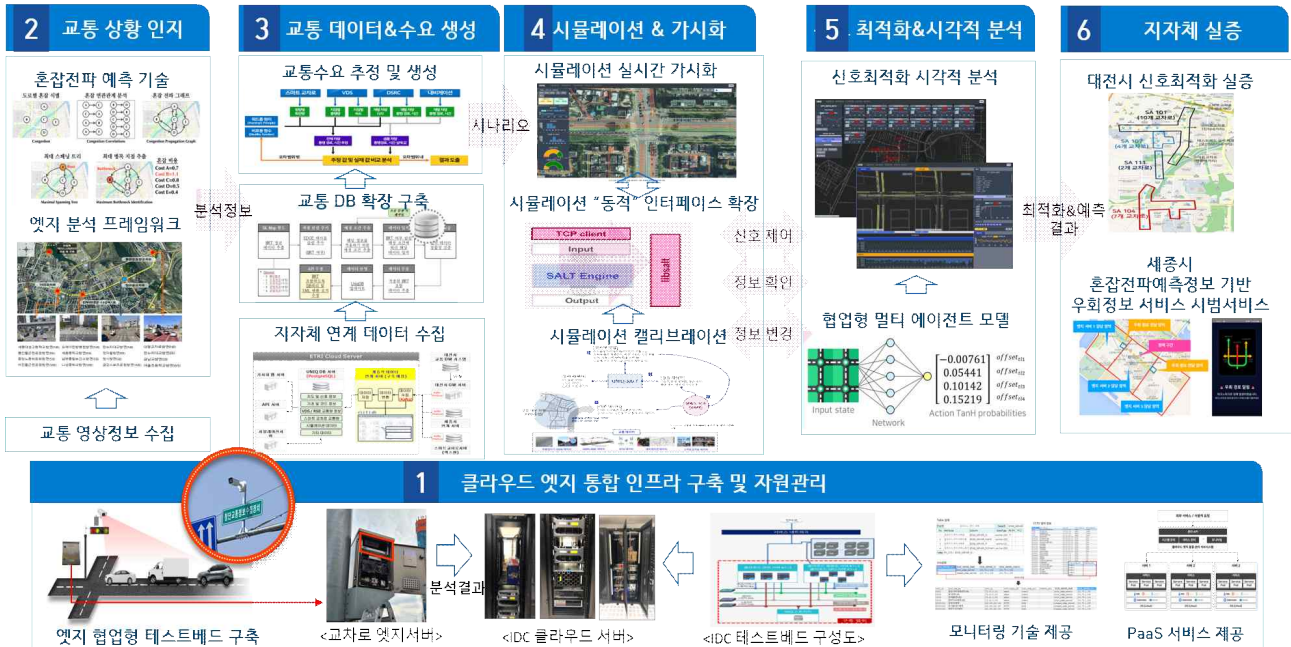


<클라우드 엣지 기반 도시교통 브레인 개념도>

- 주요 정량목표:

- * 교차로 통과시간 감소율 15% 이상
- * 신호 최적화 신호 교차로 개수 200개 이상
- * 멀티 에이전트 신호 최적화의 클라우드-엣지 기반 분산 처리 지원
- * 신호 최적화 시각적 분석 모듈 수 2개 이상
- * 혼잡 전파 예측 정확도 F1-score 0.85 이상
- * 교통 수요 추정 오차 MAPE 10 이하

□ 추진 현황 요약(2차년도 종료 기준)



<도시교통 브레인(UNIQ) 개발 현황>

- 교차로 통과시간 감소율 (2차년도 목표: 5% 이상, 달성: 5.64%)
 - 대전 도안 지역에 시뮬레이션 기반 멀티 에이전트 강화학습 모델을 적용하여 기존 신호와 비교: 교차로 통과시간 -10.8% ~ 17.35%(평균 5.64%) 감소
- 신호최적화 신호 교차로 개수 (2차년도 목표: 20개 이상, 달성: 23개)
- 신호최적화 시각적 분석 모듈 수 (2차년도 목표: 1개 이상, 달성: 1개)
 - 다중 교차로의 신호최적화 학습 과정과 추론 결과를 시공간 변화에 따라 분석
- 혼잡전파 예측 정확도 (2차년도 목표: F1 Score¹⁾ 0.7 이상, 달성: F1-Score 0.702)
 - 대전시 신호 실증 대상 지역의 DTG 실데이터를 활용하여 혼잡전파 예측
- 교통수요 추정 정확도 (2차년도 목표: MAPE²⁾ 20% 이하, 달성: MAPE 0.2 ~ 20%)
 - 실측 교통량과 추정 생성한 차량 수요를 사용한 시뮬레이션 결과로부터의 동일지점 교통량 비교
- 특허 출원 (달성: 국내 4건, 국제 1건 출원준비중)
- 논문(SCIE) (달성: 2건)

1) F1-score: the harmonic mean of precision and recall

2) MAPE: Mean absolute percentage error

2

클라우드 엣지 테스트베드 구축

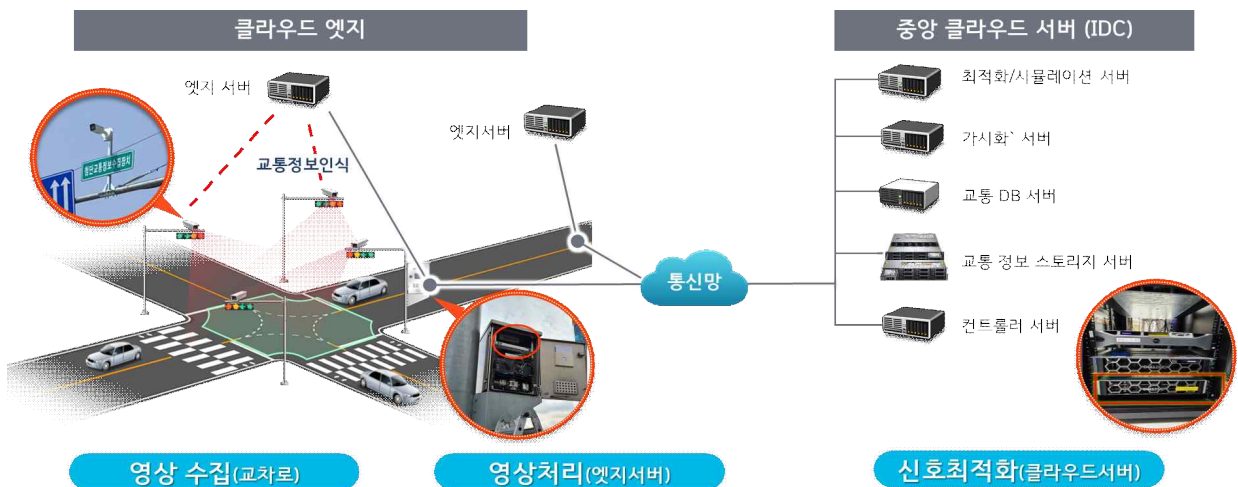
□ 클라우드 엣지 영상 수집 및 분석

○ 지자체 스마트교차로와 연계하여 교차로 엣지서버 및 중앙 클라우드 서버 구축

- 엣지서버: 대전시 충대오거리, 세종시 첫마을교차로

- 중앙 클라우드 서버: IDC 센터에 구축

※ **[참고1]** 지자체 첨단교통관리시스템(ATMS) 구축 사업으로 대전시 86개, 세종시 10개 교차로로부터 영상 수집 및 도시통합센터 서버에서 영상을 수집·분석하여 과제에 활용



<클라우드 엣지 테스트베드 개념도>



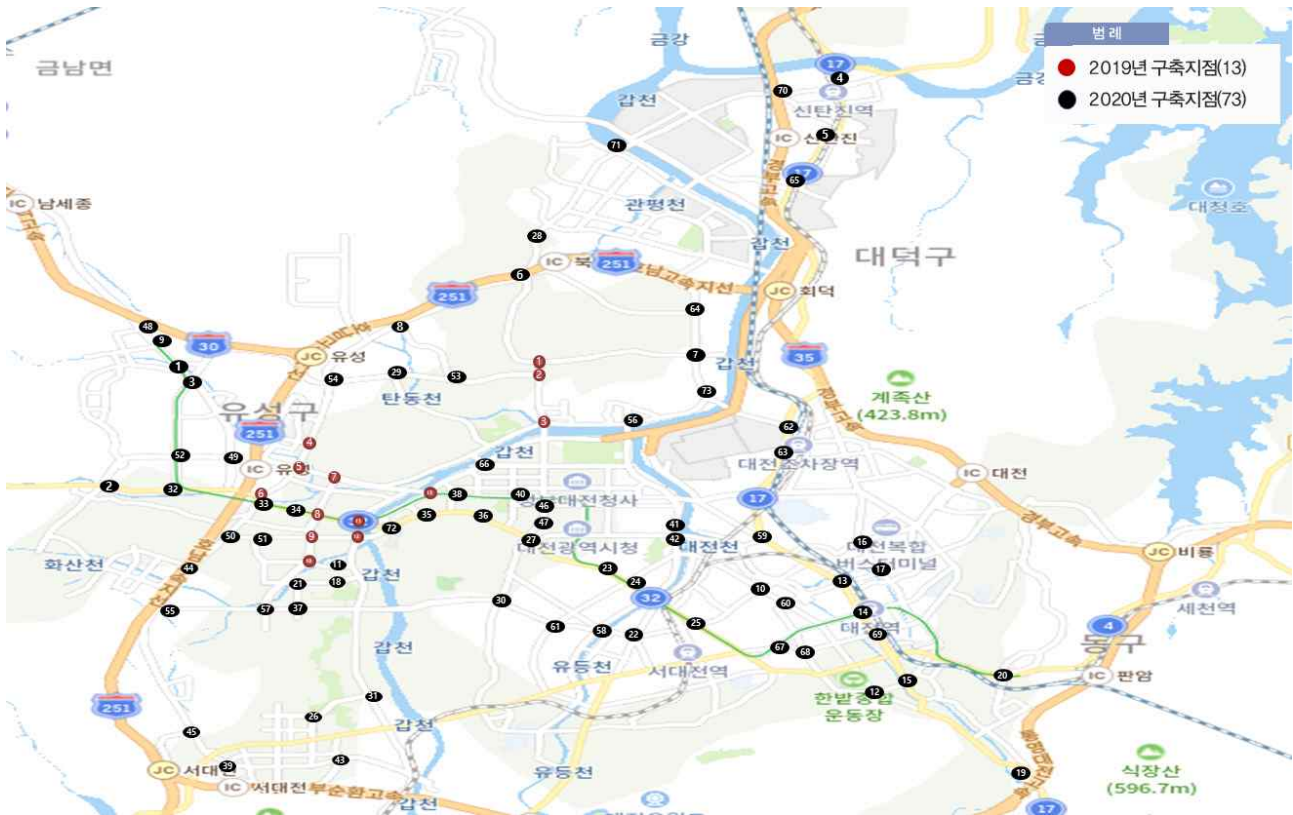
<대전광역시 충대오거리 테스트베드>



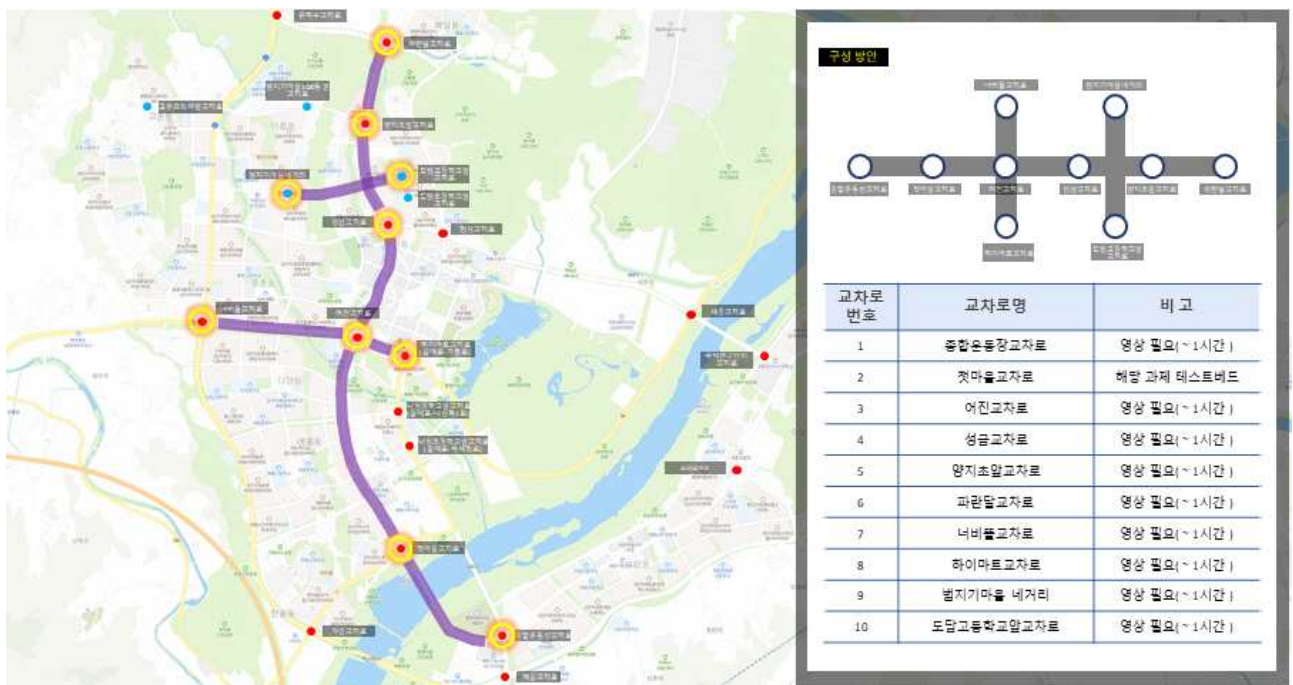
<세종시 첫마을교차로 테스트베드>

[참고1] 대전시/세종시 스마트교차로 구축 현황

□ 대전시 86개소 지점도



□ 세종시 10개소 지점도

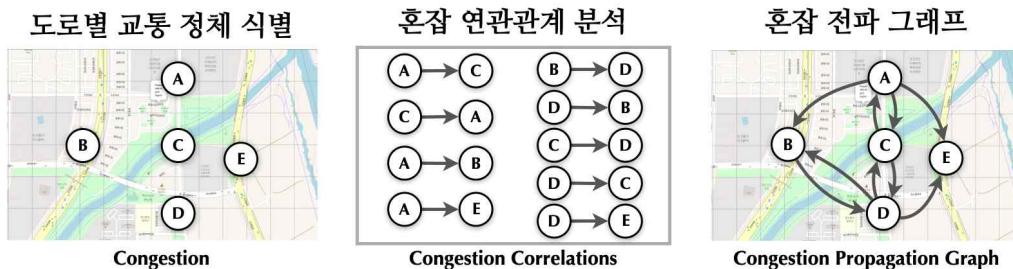


□ 클라우드 엣지 분석 프레임워크 개발

- 교차로 엣지서버의 딥러닝 기반 교통량 분석 [참고2-1]
- 엣지 서버-중앙클라우드 서버 간 인터페이스를 통해 교통 데이터 플랫폼으로 분석 결과 전송 및 저장

□ 클라우드 기반 혼잡전파 예측 및 유사패턴 교차로 그룹 탐지

- 교통혼잡전파 예측을 통해 교통신호 최적화를 위한 주요 교차로 탐색
 - 사전 학습된 예측 모델기반 학습 데이터 변화 적응형 모델 개발 완료
 - 시간별 도로망 정체상태 기반 혼잡전파 예측을 위한 학습 데이터 모델링 진행중



<혼잡전파 그래프 구축을 위한 주요 과정>

- 신호최적화 전이학습 후보지역 선정을 위한 교통 혼잡 패턴 유사 교차로 그룹 탐지
 - 그래프 유사도 계산 기법: 그래프 뉴럴 네트워크(Graph Neural Networks; GNNs)를 이용한 혼잡전파 서브 그래프간의 유사도를 예측하는 모델 및 알고리즘 설계 진행 중 [참고2-2]

[참고2-1] 엣지서버 딥러닝 기반 교통량 분석

- 방향별/차선별/차종별 교통량, 회전교통량, 차선별 대기열 등 인식

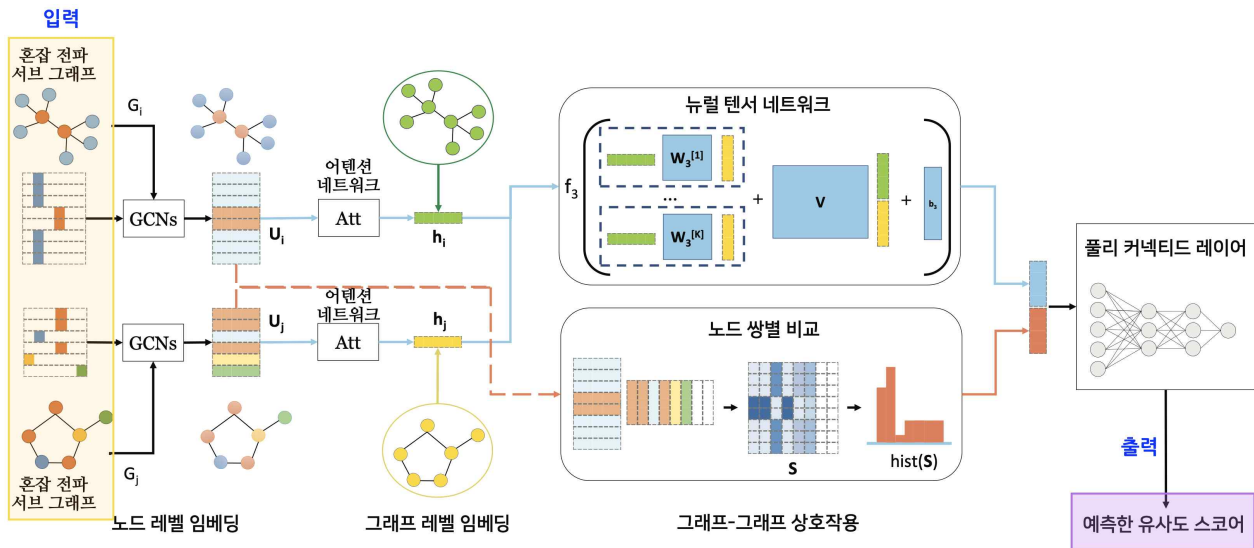


<교통 객체 정보생성을 위한 영역 설정>



<차로별 분석을 통한 교통 객체 정보 생성>

[참고2-2] 그래프 유사도 계산 기법의 네트워크 구조



<혼잡전파 서브 그래프간 유사도 계산을 위한 GNN기반 네트워크 구조>

□ 도로망 및 신호데이터 구축

- 대전광역시, 세종특별자치시 행정복합지역에 대한 도로망 데이터 및 실운영 신호데이터 데이터베이스 구축

※ 대전광역시 전지역 1339개소(일반 314, 온라인 1085) 신호 데이터 구축 완료, 세종특별자치시 전체 388개소 중 신호DB가 확보된 아름동, 고운동, 종촌동, 도담동 지역의 데이터구축

□ 교통수요 추정 및 생성

- (교통 수요 추정 및 생성) 지자체 실 교통데이터를 상호 보완적으로 사용하여 교통 시뮬레이션을 위한 전체 차량수요(통행량) 데이터를 추정

- 국가교통자료(가구통행실태조사) 데이터를 전처리하여 통행 O-D 구축

※ 가구통행실태조사에는 행정구역별 가구의 구성원, 차량보유여부, 통행목적, 수단, 통행 빈도 등을 조사함.

※ O-D (Origin-Destination)란 전체 도로망을 존(zone)으로 나누고, 존 사이의 통행유출과 통행유입의 개념을 적용하여 그 결과로 나온 매크로한 통행량임

- T-map 주행정보 및 지자체 교통 데이터(RSE, 스마트교차로, DTG 등 [\[참고3\]](#))를 보완적으로 활용하여 시뮬레이션을 위한 교통량 추정

- 실측 교통량(VDS)과 추정 생성한 차량 수요를 사용한 시뮬레이션 결과로부터의 동일지점 교통량을 비교: MAPE 0.2~20% 달성

※ 기존의 서울시 강남4개구의 수요에 비해 정확도 향상

<교통 수요 추정 정확도>

연번	도로명	실측치 (대/시, 평균)	추정치 (대/시)	MAPE
1	월드컵 대로 (상행)	674	809	20.0%
2	월드컵 대로 (하행)	1180	1,369	16.0%
3	동서 대로 (상행)	1419	1,478	4.2%
4	동서 대로 (하행)	1048	1,046	0.2%
5	도안 대로 (하행)	450	481	7.1%

※ 실측 교통량이 있는 지점을 비교

[참고3] 도시교통 브레인에서 활용중인 민간·공공 교통 데이터

□ 민간 데이터(T-map)

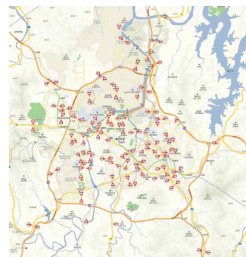
- 도로망 데이터: 대전광역시/세종특별자치시(행정복합도시지역)의 지도 형상데이터를 변환하여 도로망 DB 구축
- 차량 주행데이터: 개별차량의 통행경로 및 시간 수집

□ 공공 데이터(대전시, 세종시)

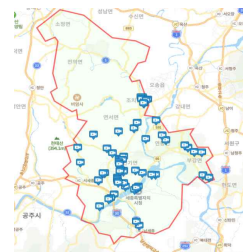
- 첨단교통정보수집장치(스마트교차로): 영상기반 교차로 통행정보(회전교통량, 점유율, 대기행렬길이 등) 수집 및 차종 분류 후 데이터로 저장
- 영상식 차량검지기(VDS: Vehicle Detection System): 영상을 통해 운영자가 설정한 검지영역을 통과한 차량의 위치를 추적하고 이미지 처리 기술을 통해 지점별 통행량과 속도를 수집하는 시스템



<VDS 예시도>

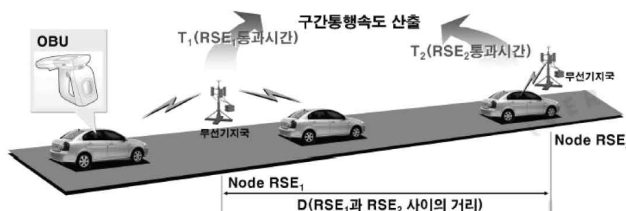


<대전시
129개>

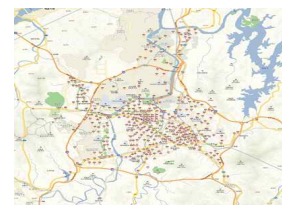


<세종시 32개>

- DSRC-RSE (Dedicated Short-Range Communications-Radiated Spurious Emission): 도로변에 설치된 노변기지국(RSE)과 주행하는 차량의 OBU(하이패스 단말기, 승용차요금제 단말기) 간의 근거리 무선통신을 통하여 교통정보를 수집. 2개 이상의 RSE 수집정보를 매칭하여 구간 교통정보 산출



<RSE 데이터를 통해 구간통행속도 산출>



<대전시 407개>

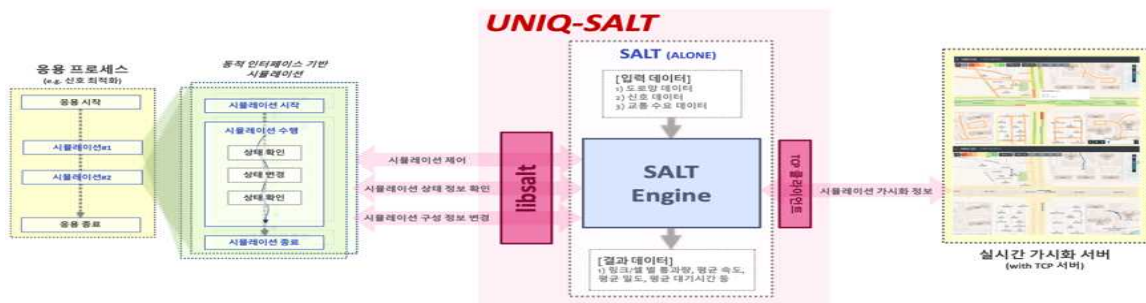
- DTG (Digital Tacho Graph): 차량운행기록을 실시간으로 저장하는 기기로 차량의 GPS 위치, 주행속도, 분당 엔진회전수(RPM), 자동차상태 등을 수집
- 버스 주행정보 데이터: 버스의 노선 및 실시간 운행정보를 수집하여 오픈 API로 제공

□ 교통 시뮬레이션 실증

- 대전광역시 전체 및 세종특별자치시 일부 지역에 대한 시뮬레이션 수행 및 캘리브레이션을 통한 시뮬레이션 정확도 개선 [참고4-1]
 - 평균 통과 교통량 정확도: MAPE 1~27% (평균 14.46%)
 - 평균 통과 속도 정확도: MAPE 2~30% (평균 13.23%)

□ 시뮬레이션 기능 확장

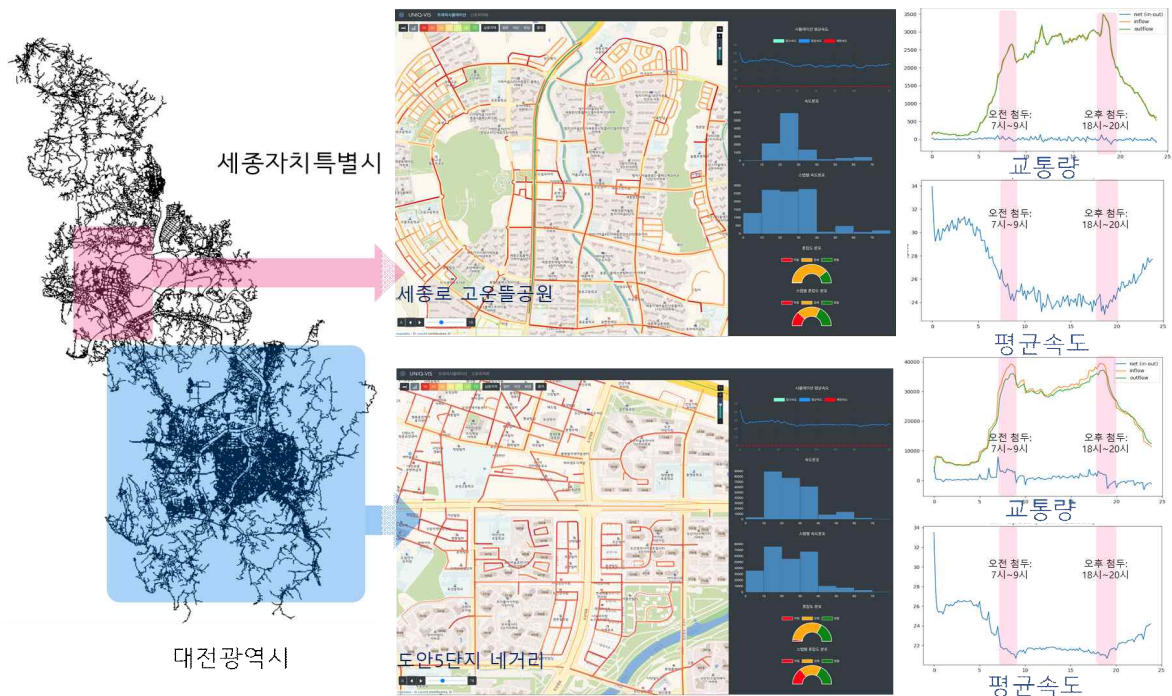
- (동적 인터페이스, libsalt) 신호최적화와 같은 독립된 응용 프로세스에서 시뮬레이션 코어 함수를 활용하기 위한 동적 인터페이스 개발
 - 시뮬레이션 제어, 시뮬레이션 정보 획득, 시뮬레이션 상태 정보 획득, 시뮬레이션 정보 변경 등



<UNIQ-SALT 동적 인터페이스를 통한 신호최적화 및 실시간 가시화 지원>

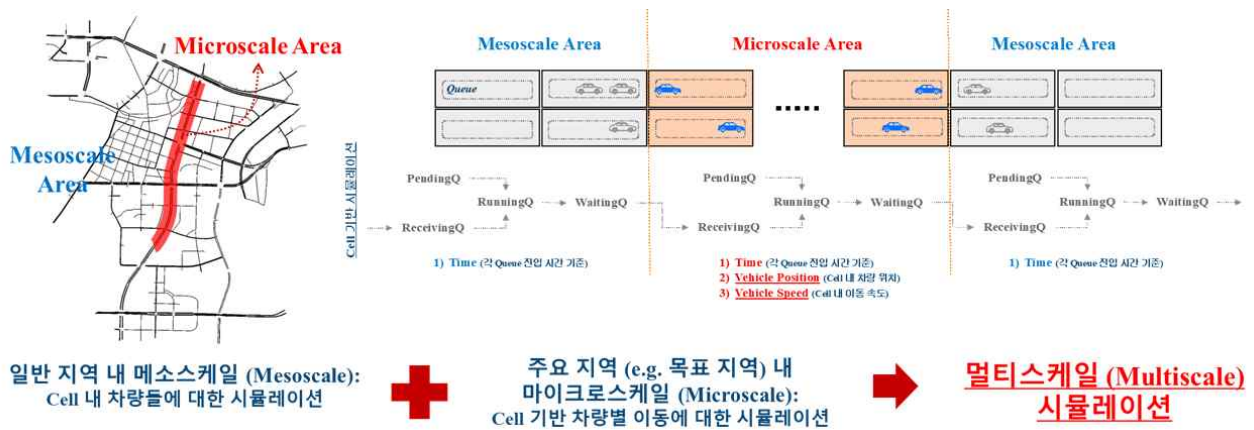
- (시뮬레이션 실시간 가시화) 시뮬레이션 엔진과 가시화 서버 간 통신 채널을 통해, 시뮬레이션 수행 상태 결과를 가시화 서버로 전송
 - ※ 기존에는 시뮬레이션 수행 후 결과 데이터를 재생하는 방식으로 제공
- (멀티스케일 시뮬레이션) 정확도 개선을 위해 주요 교차로 지역에 대해서는 개별 차량에 대한 마이크로스케일 모델을 지원하고, 성능을 위해 그 외 지역은 메소스케일 모델을 지원 [참고4-2]

[참고4-1] 시뮬레이션 실증 결과



<대전광역시 및 세종특별자치시 교통 시뮬레이션>

[참고4-2] 멀티스케일 시뮬레이션 지원



<UNIQ-SALT 멀티스케일 시뮬레이션 지원>

※ Micro-simulation: 개별 차량의 이동을 모델링해서 수행. 정확하지만 계산이 많아 수행속도가 느림.

Macro-simulation: 도로의 구간의 차량의 진출입을 포함한 차량 대수의 거동을 모델링. 차선 변경 등을 모델링하지는 못함.

Meso-simulation: 도로의 구간의 차량의 진출입과 구간 내 차량 대수의 거동을 모델링을 기본으로 차선 변경 등을 반영할 수 있음.

□ 단일 교차로 교통신호 최적화

○ 경찰청네거리(대전 둔산) 실제 신호와 교통량을 적용하여 강화학습 기반 신호최적화 모델 생성

- 약한 제약조건 신호제어 모델: 신호 순서를 유지하며 교차로 상태와 보상에 따라 신호를 변경하는 신호제어 모델 생성 → 성능(대기시간)이 크게 향상되었으나, 빈번한 신호 변경으로 보행시간 확보 불가. 현실 적용 불가

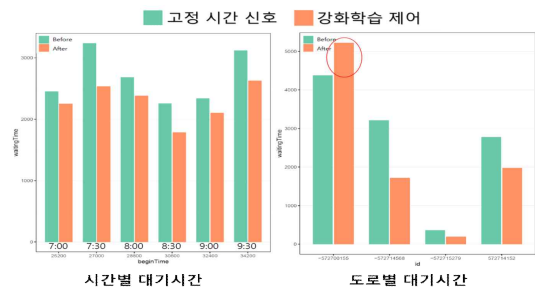
- 강한 제약조건 신호제어 모델: 신호 순서를 유지하며 최소녹색과 최대녹색의 범위 내에서 신호를 변경하는 신호제어 모델 생성 → 성능(대기시간)은 다소 향상. 현실 적용 가능

※ 신호의 제약조건: 신호의 현시순서, 최소녹색 및 최대녹색(교차로 방향별 신호는 보행자 신호와 신호의 주기를 고려하여 정한 최소녹색과 최대녹색을 만족해야 함)

※ 강화학습 기반 다중 교차로 신호 제어 관련 기존 연구들은 신호의 제약조건을 고려하지 않아 현실 적용 불가 [참고5]



시간대별 대기시간
<약한 제약조건 신호제어>



평균 대기시간 및 도로별 대기시간
<강한 제약조건 신호제어>

[참고5] 신호최적화 기존 연구 분석

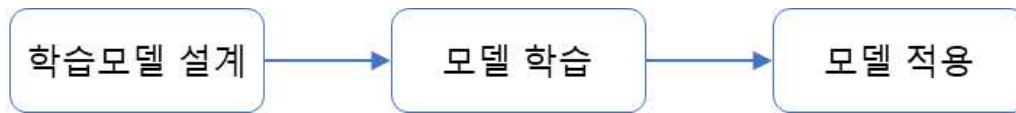
□ 기존 연구들의 한계점

- 성능(교차로 통과시간 감소율)이 모두 크게 개선되었으나 신호의 제약조건을 전혀 고려하지 않음. 예를 들어, 최소 녹색시간을 확보하지 않음으로써 보행자 통행 불가
- 데이터 적용면에서도, 지도와 수요만 실데이터를 기반으로 하며 신호는 실제 신호데이터가 아닌 연구용 생성 데이터임

※ 참고문헌

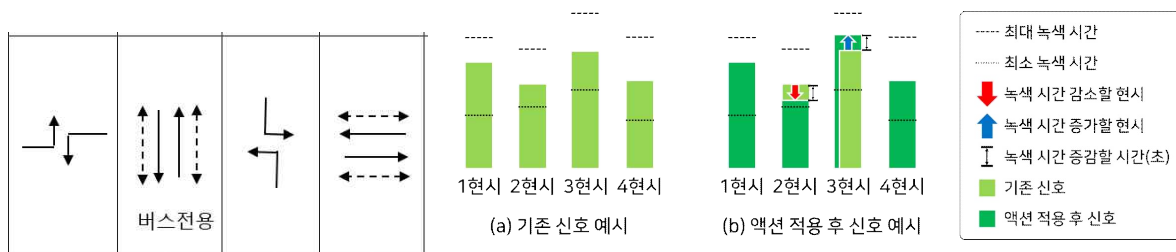
- [Wei18] H. Wei, G. Zheng, H. Yao, and Z. Li, "Intellilight: A reinforcement learning approach for intelligent traffic light control," In *Proceedings of the 24th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining*, 2018.
- [Wei19] H. Wei, C. Chen, G. Zheng, K. Wu, and V. Gayah, "PressLight: Learning Max Pressure Control to Coordinate Traffic Signal in Arterial Network," In *Proceedings of the 25th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining*, 2019.
- [Cha20] C. Chen, H. Wei, N. Xu, G. Zheng, and M. Yang, "Toward A thousand lights: Decentralized deep reinforcement learning for large-scale traffic signal control." In *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence* (Vol. 34, No. 04, pp. 3414-3421), 2020.

□ 다중 교차로 교통신호 최적화



○ (강화학습 모델 설계) 녹색신호를 제어하는 모델을 설계

- (에이전트 설계) 각 교차로마다 하나의 에이전트가 개별 제어하는 독립형 에이전트(Double Deep Q-Network, DDQN)와 하나의 에이전트가 각 그룹 내 모든 교차로의 신호를 동시 제어하는 협업형 에이전트(Proximal Policy Optimization, PPO) 모델 설계
- (액션 설계) 현실 제약 조건을 반영하기 위해 주기를 고정하고 최소 녹색과 최대 녹색의 범위 내에서 현시의 비율을 조정



<교차로 4현시의 예>

<현실 제약 조건을 반영한 액션 예시>

○ (모델 학습) 대전시 실데이터를 사용하여 신호최적화 학습모델과 교통 시뮬레이터를 연동하여 학습 수행 [참고6-1]

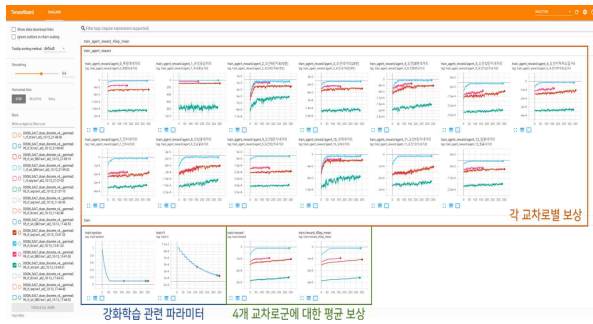
- 실험환경: 실증 지역(대전시 도안 지역)의 23개 교차로/오전 침두 2시간
- 성능 개선을 위해 다양한 변수를 변경하며 최적의 학습 조합 탐색

※ 학습률, 네트워크 레이어 개수/크기, 미래 보상 감가율, 랜덤 액션 확률, 배치 크기 등

○ (모델 적용) 학습된 모델을 시뮬레이션에 적용하여 신호 추론 [참고6-2]

- (독립형) 기존 신호 대비, 교차로 통과시간 -4.77% ~ 9.29% 감소하였으며 평균 3.06% 감소
- (협업형) 기존 신호 대비, 교차로 통과시간 -10.8% ~ 17.35% 감소하였으며 평균 5.64% 감소

[참고6-1] 신호 학습 결과



<독립형 에이전트의 학습 그래프>



<협업형 에이전트의 학습 그래프>

[참고6-2] 신호 적용 결과 상세

<기존 신호 대비 교차로 통과시간 개선율 비교 - 독립형 멀티 에이전트>

교차로명	교차로군	차량 통행 시간 합 (기존신호)	차량 통행 시간 합 (강화학습제어)	차량 통행 시간 합 (개선율)
진터네거리	SA 101	330938	330488	0.14%
인삼골네거리	SA 101	162810	148863	8.57%
도안5단지4	SA 101	410727	405816	1.2%
도안1단지4	SA 101	248816	257021	-3.3%
원골네거리	SA 101	161651	154331	4.53%
목원대네거리	SA 104	146774	144001	1.89%
도안네거리	SA 104	75587	78484	-3.83%
도안28번4	SA 104	69437	72752	-4.77%
도안12단지4	SA 104	315091	301315	4.37%
도안지하차도입구4	SA 104	312423	298930	4.32%
유성중삼거리	SA 107	1994	1823	8.58%
도안9단지4	SA 111	27611	25045	9.29%
상대네거리	SA 111	32798	32198	1.83%
평균		1243211	1205205	3.06%

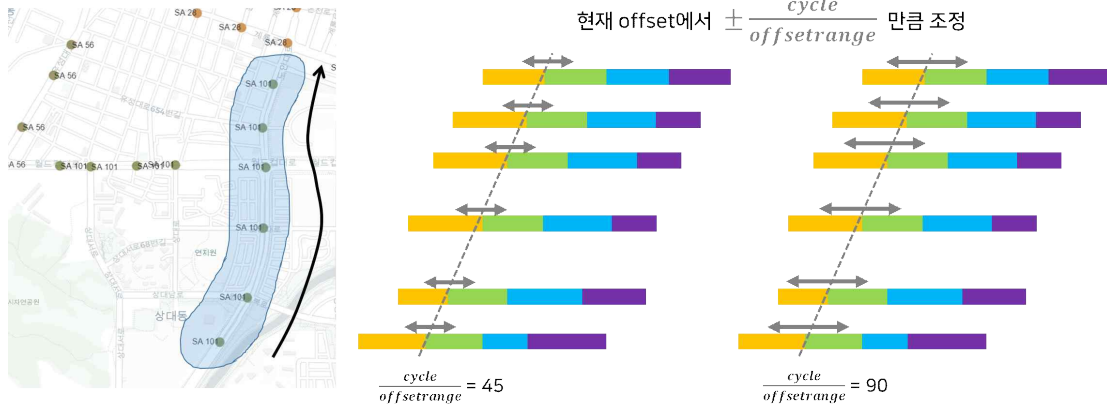
<기존 신호 대비 교차로 통과시간 개선율 비교 - 협업형 멀티 에이전트>

교차로명	교차로군	차량 통행 시간 합 (기존신호)	차량 통행 시간 합 (강화학습제어)	차량 통행 시간 합 (개선율)
진터네거리	SA 101	321393	267636	16.73%
인삼골네거리	SA 101	150377	152417	-1.36%
도안5단지4	SA 101	400272	330833	17.35%
도안1단지4	SA 101	237164	222427	6.21%
원골네거리	SA 101	157893	133903	15.19%
목원대네거리	SA 104	140078	155206	-10.8%
도안네거리	SA 104	72502	63944	11.8%
도안28번4	SA 104	66754	58269	12.71%
도안12단지4	SA 104	298543	303119	-1.53%
도안지하차도입구4	SA 104	296770	308039	-3.8%
유성중삼거리	SA 107	1924	1593	17.2%
도안9단지4	SA 111	25233	26014	-3.1%
상대네거리	SA 111	31788	30464	4.17%
평균		1186144	1119189	5.64%

□ 다중 교차로 교통신호 최적화 성능 개선

※ 3차년도 진행중인 실험임

- (강화학습 모델 설계) 녹색신호와 오프셋(offset)을 동시에 제어하는 모델을 통한 신호최적화 성능향상



<오프셋(Offset) 조정 액션 예시>

- ※ 오프셋(offset)이란 상류부 교차로의 녹색신호 시작시점과 하류부 교차로의 녹색신호 시작시점의 차이. 상류부 신호교차로에서 녹색신호를 받고 출발한 차량군이 다음 교차로에서 정지하지 않고 녹색시간을 이용하여 그대로 통과하도록 신호체계를 조정하여 차량의 지체를 최소화하기 위해 사용됨.
- (실험결과) 협업형 멀티 에이전트의 학습된 모델을 실증 지역의 모사 교통 환경에 적용하여 신호 변경 개선 효과 비교 수행
 - 기존 신호 대비, 교차로 통과시간 - 16.36% ~ 73.31% 감소하였으며 평균 10.51% 감소 [\[참고기\]](#)

[참고7] 다중교차로 신호최적화 성능개선 실험결과 상세

<기존 신호 대비 교차로 통과시간 개선율 비교 - 연동값 + 녹색 현시 조정>

교차로명	교차로군	차량 통행 시간 평균(초)		개선율
		기존 신호	강화학습제어	
구암119안전센터삼거리	SA 101	11.487	11.485	0.01%
도안1단지(단)	SA 101	21.264	13.520	36.42%
도안1단지네거리	SA 101	37.324	34.120	8.58%
도안5단지네거리	SA 101	75.442	83.117	-10.17%
상대초교(단)	SA 101	9.426	10.968	-16.36%
원골(단)	SA 101	34.676	30.892	10.91%
원골네거리	SA 101	61.324	69.146	-12.76%
유성고후문(단)(5-1번)	SA 101	27.383	7.310	73.31%
인삼골네거리	SA 101	59.858	61.407	-2.59%
진터네거리	SA 101	73.561	58.072	21.06%
전체 차량 평균		41.295	36.953	10.51%

□ 교통신호 최적화 성능향상 및 안정화

- 다양한 강화학습 기법을 적용하는 한 편, 녹색신호와 오프셋(offest) 외의 교통 공학적인 방법 등을 이용하여 성능개선 중

※ 교통신호 최적화를 연구하는 전문가 그룹과의 적극적인 연구 교류 추진

□ 최적화 지역 범위 확대

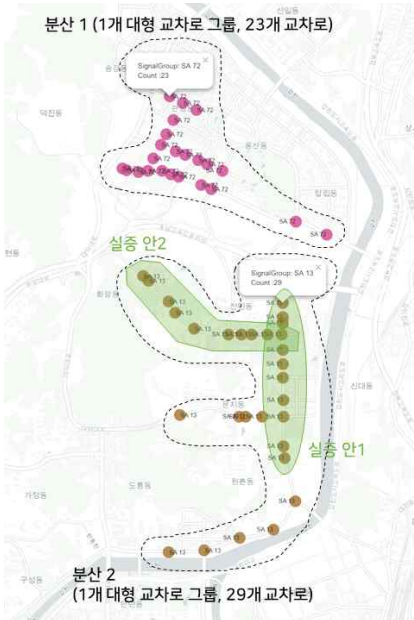
- (신호최적화 시간 확장) 현재 대전 도안 지역 20여개 교차로 지역 오전 7:00~9:00에서 오전첨두, 낮시간, 오후첨두를 포함하는 일단위 실험 필요
- (신호최적화 지역 확장) 현재 대전 도안 지역 20여개 교차로 지역을 확장하여 유성구 남쪽과 북쪽, 가정로 인근 지역, 둔산지역 등의 신호를 분석하고 실험 지역 확대 [\[참고8\]](#)
- (분산처리) 광역 네트워크 신호최적화 분산처리 기술 개발
 - 신호최적화 지역이 확장될수록 신호학습 성능이 급격히 떨어지므로 분산 처리가 필요함. 이를 해결하기 위한 분산처리 프레임워크 개발중

□ 지자체 실제 신호 적용

- 학습 신호를 실제 교차로에 안전하게 적용하기 위해서는, 신호의 제약 조건 외에 신호운영주체(대전시)의 운용 조건들을 만족해야 함
 - 학습 모델을 적용한 결과로 나온 신호를 분석하여 TOD (Time of Day) 형식으로 변경하는 등의 작업이 필요함

[참고8] 신호최적화 지역 후보 선정

□ 신호최적화 지역 범위 확대 후보



<유성구(북) 51개 교차로>



<유성구(남) 59개 교차로>



<서구/유성구 53개 교차로>