

신도시의 자율주행 전용차로 도입 효과와 설치 가능성 분석 연구

신도겸 / 변완희 / 신병훈 / 박지은

report

연구관리 2024-013호

신도시의 자율주행 전용차로 도입 효과와 설치 가능성 분석 연구

지 은 이 신도겸 • 변완희 • 신병훈 • 박지은
발 행 인 김홍배
발 행 처 한국토지주택공사 토지주택연구원
주 소 (34047) 대전 유성구 엑스포로 539번길 99
홈페이지 <http://lhri.lh.or.kr>

전화번호 042-866-8569
이 메 일 dkshin@lh.or.kr

- 이 출판물은 우리 공사의 업무상 필요에 의하여 연구·검토한 기초자료로서 공사나 정부의 공식적인 견해와 관계가 없습니다.
- 우리 공사의 승인 없이 연구내용의 일부 또는 전부를 다른 목적으로 이용할 수 없습니다.

신도시의 자율주행 전용차로 도입 효과와 설치 가능성 분석 연구

Study of Seeking the Possibility and Effects of
Implementing the Dedicated Automated Vehicle Lanes into New Cities

신도겸 · 변완희 · 신병훈 · 박지은

참여연구진

연구책임

신도겸 LH 토지주택연구원 수석연구원

연구진

변완희 LH 토지주택연구원 연구위원

신병훈 LH 토지주택연구원 책임연구원

박지은 LH 토지주택연구원 주임연구원

위탁용역(SUMO 모델링) : 목원대학교 산학협력단

연구심의위원(가나다순)

김태균 LH 토지주택연구원 연구위원

김형철 충남연구원 연구위원

도명식 한밭대학교 학장

윤태관 국토연구원 연구위원

이정범 대전세종연구원 책임연구위원

장현웅 LH 선교통계기획처 부장

조만현 LH 선교통계기획처 차장

■ 연구 목적

- 자율주행차의 도입과 확산을 대비하여 신도시에서의 자율주행차를 위한 인프라의 효과와 도입 가능성을 살펴봄
- 자율주행차와 일반차가 혼입 운행되는 기간 동안 자율주행차의 운행을 위한 상대적으로 더 나은 환경을 제공할 것으로 기대되는 전용차로에 관한 연구를 수행
 - 자율주행 전용차로 관련 기존 연구와 설치(계획) 사례
 - 신도시(3기 신도시)를 대상으로 자율주행 전용차로 효과 분석
 - 자율주행 전용차로의 필요시 도입 시기 및 조건 도출

■ 연구의 범위

- 본 연구는 자율주행차와 일반차가 혼입 운행되는 환경을 연구대상으로 함
 - 자율주행차 혼입률 60%를 목표 혼입률로 설정(2055년)¹⁾
- 도심도로(단속류)의 교통흐름으로 한정
- 승용차와 버스만 고려

■ 선행연구 고찰

- 자율주행 전용차로를 주제로 한 선행연구를 살펴본 결과 다음과 같이 요약할 수 있음
- 자율주행 전용차로에 대한 연구는 고속도로(연속류) 중심으로 수행되었으며, 도심도로(단속류)에 대한 연구는 초기 단계

1) 신도겸 외(2023), 「자율주행시스템을 고려한 신도시 도로 네트워크 구축방안(I)」, 연구기획 2023-011, 토지주택연구원.

- 연구의 주목적은 전용차로의 설치 위치와 위치별 차량 흐름 상태의 변화와 효과 분석
- 연구 방법은 미시시물레이션(Micro-simulation) 모델링을 활용하였으며, 상용 패키지인 VISSIM을 이용한 분석이 국내에서는 주류
- 분석 대상지는 연구 초기에는 가상의 고속도로를 설정하여 수행하였으나, 최근에는 실제 고속도로 및 도시 내 도로의 일정 구간을 대상으로 수행
- 연구결과는 시물레이션 조건에 따라 다양하지만, 다음의 4가지로 요약 가능
 - 자율주행차 혼입률 10~20%에서는 전용차로 이외의 차로가 과포화되어 전용차로 도입에 대해 부정적
 - 단, 전용차로 자체의 통행 흐름은 개선
 - 자율주행차 혼입률 10~20%에서 전용차로를 설치한다면 가로변 차로에 설치하는 것이 이동성 측면에서 더 효과적
 - 자율주행차 혼입률 30~40%일 경우 전용차로 설치가 효과가 있음
 - 혼입률 30%까지는 가로변 차로, 30~70%에서는 전용차로 미설치가 타당
 - LOD(Level of Service) D 이상인 경우 전용차로는 2차로 이내, LOS E 이상인 경우 전용차로 3차로가 필요

■ 자율주행 전용차로 설치(계획) 사례

- 자율주행 전용차로 설치는 미국, 중국, 일본이 주도적으로 진행하고 있음
- 현재까지는 모든 사례가 고속도로를 대상으로 하고 있으며, 일반 승용차의 통행 개선 외에도 자율 군집주행을 활용한 화물차량 통행 개선 역시 주요 목적
- 사례 1: 미국 CAVNUE
 - 민간 컨소시엄이 주축인 프로젝트
- 사례 2: 중국 장쑤고속도로
 - 각종 센서와 카메라 등의 장치가 통합된 스마트 가로등 3,700개 이상 설치
- 사례 3: 일본 신토메이고속도로
 - 세계 최장(115km)이며, Lv4 수준의 자율주행이 가능한 화물차량 이동이 주목적

■ 전용차로 효과 분석

■ 분석 개요

- 고양창릉지구의 화랑로 4.7km 구간 을 대상으로 시뮬레이션 모델링 수행
 - 3~5차로의 다양한 차로 구성
 - 12개의 신호교차로 존재하며, 교차로 설치 간격이 짧고, 차선의 변화가 잦음
 - 통과 교통량이 가장 많은 구간
 - 남북측으로 가로변버스전용차로 설치계획이 있으며, 동서측으로 중앙버스차로 운영 중
 - 지하철도 존재
- 시뮬레이션 Tool은 마이크로 시뮬레이션인 SUMO를 활용하였으며, 모델링을 위한 기하구조, 교통량, 신호 현시 등의 자료는 고양창릉지구 교통영향평가 자료를 활용
 - 자율주행 수준은 Lv 4
 - 차량추종모형
 - 일반 승용차 : Krauss 모형
 - 자율주행차 : IDM(Intelligent Driver Model)

■ 분석 시나리오

- 자율주행 전용차로의 운영 방안과 자율주행차 혼입률의 변화에 따라 총 29개의 시나리오로 구성(Base 시나리오 포함)
 - **A0(Base) 시나리오** : 현재 고양창릉의 계획 네트워크, 자율주행차가 운행하지 않는 상태
 - ※ 교통량은 교통영향평가의 2030년 기준 모델링 구간의 교통량 적용
 - **시나리오 A** : 자율주행차와 일반차가 도로를 공유하는 **혼입 운행**
 - **시나리오 B** : 버스전용차로를 버스와 자율주행차가 공유하는 **버스전용차로 공유**
 - **시나리오 C** : 버스전용차로는 현재와 같이 최우측(보도변)에 두고 버스전용차로의 좌측에 전용차로를 설치하는 **버스좌측전용차로**
 - **시나리오 D** : 자율주행전용차로를 가장 우측(보도변)에 설치하고 전용차로 우측에 버스전용차로를 설치하는 **가로변전용차로**
 - ※ 시나리오 A~D는 자율주행차 혼입률 10%, 20%, 30%, 40% 50% 60%, 80%를 적용

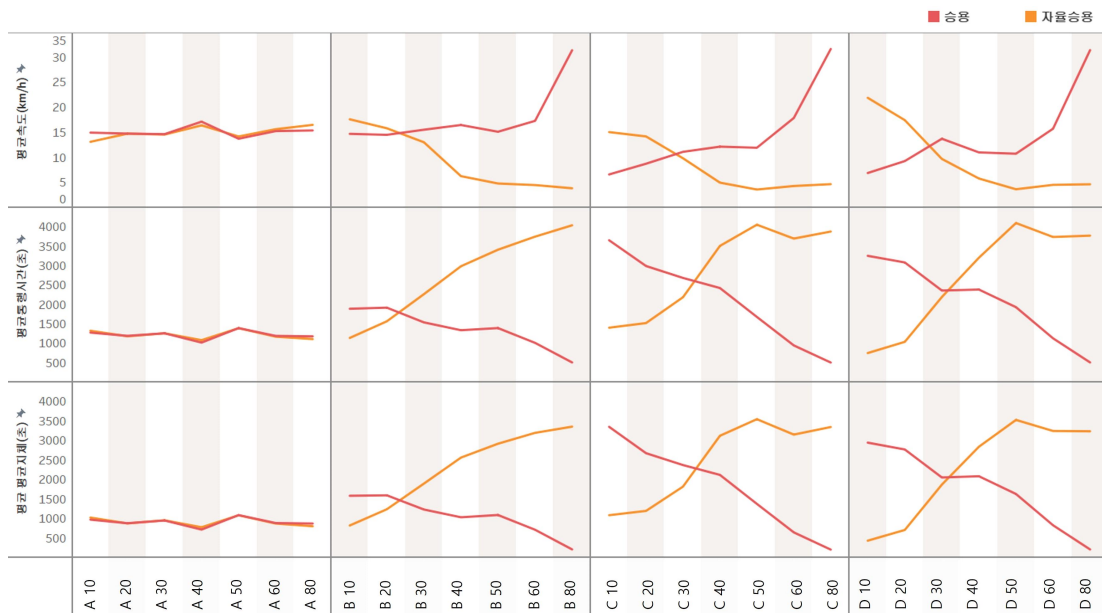
[시나리오별 차로 배치]

시나리오	4차로	3차로	2차로	1차로	1차로	2차로	3차로	4차로
A0 (Base)	버스	일반	일반	(지하) 일반	(지하) 일반	일반	일반	버스
A	버스	일반+ 자율주행	일반+ 자율주행	(지하) 일반+ 자율주행	(지하) 일반+ 자율주행	일반+ 자율주행	일반+ 자율주행	버스
B	버스 + 자율주행	일반	일반	((지하) 일반	(지하) 일반	일반	일반	버스 + 자율주행
C	버스	자율주행	일반	(지하) 일반	(지하) 일반	일반	자율주행	버스
D	자율주행	버스	일반	(지하) 일반	(지하) 일반	일반	버스	자율주행

■ 분석 결과

- 시뮬레이션 결과 혼입률에 상관없이 자율주행차와 일반차의 혼입운행이 가장 효과가 좋은 것으로 나타남
 - 전반적으로 도심 도로에서는 잦은 간격의 교차로와 교차로에서의 신호대기 등으로 인해 발생하는 지체가 더 큰 영향을 미침
 - 잦은 교차로 간격은 차선변경이 빈번하게 발생하게 됨을 의미하고, 이는 혼재 상태에서는 자율주행차의 운행여건에 악영향 또는 전체적으로 자율주행차가 장점을 발휘하게 어려운 환경을 조성
- 전용차로를 설치하여도 도심에서의 좌우회전 등을 위한 전용차로 진입과 진출이 필수이므로 큰 효과가 없는 것으로 나타남
- 자율주행차의 혼입률에 따른 각 시나리오의 효과를 비교하면 다음과 같음
 - 버스전용차로 공유(시나리오 B)의 경우 혼입률이 20% 정도로 낮은 경우에는 효과가 있는 것으로 나타남
 - 그러나 효과가 있다는 것이 극적인 개선이 있다기보다는 현재의 통행상태와 비슷한 상태를 유지한다는 의미
 - 혼입률이 30%가 넘어가면 전용차로를 이용해야하는 자율주행차가 많아지면서 효과가 없어짐
 - 그러나 자율주행차만을 고려하면 혼입률 10~20%에서는 가로변 전용차로(시나리오 D)가 가장 좋은 것으로 나타나지만, 일반차의 통행 불이익이 높아짐

- 혼입률 30%일 때 전반적으로 자율주행차와 일반차 간의 지표 값의 차이가 가장 적어 전용차로를 설치하고자 한다면 혼입률 30%일 때가 적합한 시기
- 혼입률이 40% 이상이 되면 사실상 전용차로는 설치할 이유가 없는 것으로 나타남
 - 편도 4차로 이상인 분석구간에서 1개 차선을 전용차로로 주는 구조에서는 혼입률 40%에서는 전용차로의 혼잡이 더욱 가중되어 이득이 없음
 - 본 분석을 바탕으로 편도차선의 수에 따라 전용차로가 효과를 발휘하는 비율이 다를 것으로 추론됨
- 결과적으로 전용차로의 경우 순수하게 차량 흐름만을 고려한다면 자율주행차 혼입률이 20% 이내인 환경에서 버스전용차로와 공유하는 형태가 가장 적합함



■ 전용차로 설치 및 운영 방향 제안

■ 고양창릉의 전용차로 설치 및 운영 방향 제안

○ 운영 환경 전제 조건

- 기본적으로 분석대상지의 차선구성인 편도 4차선을 기준으로 함
- 가로변버스전용차로를 운영하며, 버스통행량은 시간당 150대 수준

○ 기본방향

- 자율주행 전용차로의 설치는 자율주행차 확산 초기에 상용화를 지원하고, 이용의 편의를 제공하기 위함
- 자율주행차 이용자에게 일정 수준의 통행 편의를 제공할 수 있지만, 원칙적으로 일반차 이용자에게 과도한 불이익을 주지 않는 방향에서 운영
- 혼입률 20~30% 수준까지만 필요 시 전용차로 운영
- 버스전용차로와 공유하는 형태의 가로변전용차로로 운영
 - 버스전용차로가 없는 구간은 가로변전용차로 설치 원칙

○ 혼입률 30% 이상이 되면 원칙적으로 전용차로 폐지하고 일반차와 혼입 운행

○ 전용차로 설치 권장 교통량은 구간별 최대 교통량이 시간당 1,200대 이하

[버스차로공유형 전용차로의 단계적 운영(안)]

혼입률	4차로	3차로	2차로	1차로	1차로	2차로	3차로	4차로
~20%	버스+ 자율주행	일반	일반	(지하) 일반	(지하) 일반	일반	일반	버스+ 자율주행
20~30%	버스+ 자율주행	일반+ 자율주행	일반+ 자율주행	(지하) 일반+ 자율주행	(지하) 일반+ 자율주행	일반+ 자율주행	일반+ 자율주행	버스+ 자율주행
30%~	버스	일반+ 자율주행	일반+ 자율주행	(지하) 일반+ 자율주행	(지하) 일반+ 자율주행	일반+ 자율주행	일반+ 자율주행	버스

■ 일반 신도시에서의 전용차로 설치 및 운영 방향 제안

○ 운영 환경 전제 조건

- 자율주행 셔틀, DRT, 버스 등 자율주행 승용차 이외의 자율주행 수단의 이동과 이용자 편의를 동시에 제공하기 위한 목적
- 해당 구간의 최소 차로수는 편도 3차선으로 하고, 좌우회전 포켓이 충분히 설치된 경우

○ 기본방향

- 혼입률 20%까지는 가로변전용차로로 설치하며, 자율주행 기반의 교통수단 통행 허용
- 혼입률이 20%~30% 구간에서는 과도기적 단계로 가로변 전용차로는 유지하고, 나머지 차로는 일반차와 자율주행차 혼입 운영
- 혼입률이 30% 이상이 되면 가로변 전용차로 자율주행 기반 대중교통수단 전용으로 전환하고, 일반차와 자율주행차는 승·하차 등 임시 정차를 위해서만 특정 구역 (Flex Zone 등)만 이용하도록 제한 운영

[신도시의 자율주행 전용차로 운영 방안(안)]

혼입률	3차로	2차로	1차로	1차로	2차로	3차로
~20%	자율주행	일반	일반	일반	일반	자율주행
20~30%	자율주행	일반+ 자율주행	일반+ 자율주행	일반+ 자율주행	일반+ 자율주행	자율주행
30%~	자율주행 대중교통	일반+ 자율주행	일반+ 자율주행	일반+ 자율주행	일반+ 자율주행	자율주행 대중교통

■ 전용차로 설치 및 운영을 위한 고려사항

- 도심에서는 자율주행의 장점을 상쇄하는 다수의 요인이 존재하며, 그 중에서 중요한 다음의 3가지 사항에 대해 충분한 검토가 필요
- 자율주행차 성능의 한계
 - 현재 자율주행차의 실제 운전 능력은 일반 운전자의 운전 능력보다 뛰어나지 않음
 - ※ 기술적으로는 현재도 더 뛰어나지만, 비합습 상황, 안전 문제로 인한 제한 등으로 인해 제 성능을 발휘하기 어려움
 - 자율주행차 보급 초기에는 자율주행차가 기대만큼의 효과를 발휘하지 못할 것으로 예상
 - 특히, 도심도로의 경우 자율주행차 도입은 도로 용량 저하의 가능성이 높음
 - 그러므로 전용차로의 설치·차량 흐름 개선, 자율주행차 확대 지원 등의 도입 목적에 따라 신중히 판단하여 도입 필요
- 교차로에서의 통행 방법 결정
 - 도시의 주행환경에서 일반차와 자율주행차 모두 교차로 통행이 가장 문제
 - 특히, 전용차로를 운영할 경우 설치 위치에 따라 교차로 시점부, 종점부, 좌회전과 우회전 방식에 대한 면밀한 계획과 검토가 필요
- 가로변 이용시설에 따른 가로 공간 설계와 일반차 처리
 - 도시의 가로변에는 버스 정류장 등 필수 이용시설이 다수 존재하고 있음
 - 전용차로를 중앙에 설치하는 경우 이런 시설에 의한 문제가 적을 수 있으나, 가로변에 설치할 경우 가로변 시설을 이용하려는 타 수단과의 상충 문제가 발생
 - 버스 정류장을 예로 들면 보도 폭을 줄 일 공간이 있는 경우에는 버스 정류장을 베이형으로 설치하고, 버스만 전용차로에 잠시 출입하는 것을 허용할 수 있음
 - 반면, 보도 폭을 줄이기 어려운 경우에는 자율주행차량이 버스 정류장 앞에서 일반차량과 잠시 혼입 운영하는 구간이 필요함
 - 자율주행차의 비율과 예상 이용규모에 따라 다양한 방식으로 충분한 연구와 검토가 필요하며, 가로변 공간에 대한 적절한 설계 가이드 역시 필요

주제어

자율주행차, 전용차로, 신도시, 도로 네트워크

차례 Contents

제1장 서론	1
1. 연구 배경 및 목적	1
2. 연구의 범위 및 수행 계획	3
2.1. 연구의 범위	3
2.2. 주요 연구 내용	4
2.3. 연구 수행 방법	5
제2장 선행연구 고찰	7
1. 자율주행 전용차로의 효과	7
1.1. 기존연구의 개요	7
1.2. 연속류 대상 주요 연구	8
1.3. 단속류 대상 주요 연구	20
2. 자율주행 전용차로 설치계획 및 사례	23
3. 시사점	27
제3장 시뮬레이션을 활용한 전용차로 효과 분석	29
1. 시뮬레이션 분석 개요	29
1.1. 분석의 목적	29
1.2. 분석 대상지 및 자료 수집	29
2. 시뮬레이션 환경 구축	35
3. 전용차로 도입 효과를 위한 시나리오 설정	52
3.1. 전용차로 효과분석 시나리오	52
3.2. 지하차도 지상화와 전용차로 효과분석 시나리오	54
4. 시뮬레이션 분석 결과	56

4.1. 전용차로 효과 분석 결과	56
4.2. 지하철도 구조 개선에 따른 효과 분석	64
4.3. 자율주행 전용차로의 효과 정리	69
제4장 전용차로 설치 및 운영 방향 제안	71
1. 고양창릉의 전용차로 설치 및 운영 방향 제안	71
2. 일반적인 신도시에서의 전용차로 설치 및 운영 방향 제안	73
3. 전용차로 설치 및 운영을 위한 고려사항	74
제5장 결론	79
1. 연구결과	79
2. 연구의 한계	81
3. 향후 연구 제안	82
참고문헌	85

표차례 List of Tables

[표 2-1] 일반차와 자율주행차 모사를 위한 변수 설정값 비교	12
[표 3-1] 분석 구간 교차로 신호운영계획	33
[표 3-2] 자율주행차량 주행특성 분석을 위한 미시 교통시뮬레이션 비교	35
[표 3-3] 분석 차량 제원	38
[표 3-4] 본 연구에서 적용한 자율주행차와 일반 차량의 제어변수(파라미터) 값	39
[표 3-5] 구간별 O/D 통행량	44
[표 3-6] 미시적 시뮬레이션 모형의 정산 단계	45
[표 3-7] 정산 결과	47
[표 3-8] SUMO 검지기 종류 및 특징	49
[표 3-9] 전용차로 효과분석 시나리오별 차로 구성	52
[표 3-10] 자율주행 전용차로 도입 효과분석 시나리오	53
[표 3-11] 지하차도 지상화 시나리오의 차로 배치	54
[표 3-12] 지하차도 지상화와 자율주행 전용차로 도입 효과분석 시나리오	55
[표 3-13] Base 시나리오의 네트워크 지표값	56
[표 3-14] 시나리오 B와 GB의 차로 배치	64
[표 3-15] 시나리오 C와 GC의 차로 배치	65
[표 3-16] 시나리오 D와 GD의 차로 배치	66
[표 3-17] 시나리오 E의 차로 배치	67
[표 4-1] BRT 설치 구간에 대한 단계적 전용차로 운영(안)	72
[표 4-2] BRT 미 설치 구간에 대한 단계적 전용차로 운영(안)	72
[표 4-3] 신도시의 자율주행 전용차로 운영 방안(안)	73
[표 4-4] 자율주행차와 일반차의 성능비교	75

그림차례 List of Figures

[그림 1-1] 국내 자율주행차 혼입비율(MPR) 전망	3
[그림 1-2] 연구 수행방법	5
[그림 2-1] 시나리오별 통행 효율 지표 변화	10
[그림 2-2] 시나리오별 충돌발생 가능성 지표 변화	10
[그림 2-3] 시나리오별 분석 결과	13
[그림 2-4] 시나리오별 모델링 네트워크와 차량 구성	14
[그림 2-5] 버스겸용전용차로의 효과	15
[그림 2-6] 독립 전용차로의 효과	15
[그림 2-7] 자율주행 전용차로 분석 구간	17
[그림 2-8] 분석 대상 및 구간	18
[그림 2-9] 전용차로 시행에 따른 전체 네트워크 속도 및 지체시간 비교	21
[그림 2-10] Cavnue 미래상	23
[그림 2-11] Cavnue 대상 구간	24
[그림 2-12] HOV와 자율주행 전용차로 미래상	24
[그림 2-13] 중국 징충고속도로의 자율주행 전용차로(가운데 녹색차로)	25
[그림 2-14] 징충고속도로에 설치된 스마트 가로등	25
[그림 2-15] 신토메이고속도로 자율주행 전용차로 계획	26
[그림 3-1] 분석 대상 신도시의 토지이용계획도	30
[그림 3-2] 분석 구간	30
[그림 3-3] 분석 대상 도로 네트워크	31
[그림 3-4] 사업지 내부 가로구간 교통량도(대/시)	32
[그림 3-5] 사업지 내부 교차로 교통량도(대/시)	32
[그림 3-6] 차량추종모형의 종류	36
[그림 3-7] 시뮬레이션 네트워크	40
[그림 3-8] 버스와 자율주행차 공유 차로 구축	41

[그림 3-9] 전용차로 구축	41
[그림 3-10] 지하차도 지상화 및 전용차로 구축	42
[그림 3-11] 중앙전용차로 구축	42
[그림 3-12] O/D 구축을 위한 유·출입 지점	43
[그림 3-13] 정산을 위한 교통량 측정 구간	46
[그림 3-14] 남북측 검지기 설치 구간	50
[그림 3-15] 동서측 검지기 설치 구간	50
[그림 3-16] 시뮬레이션 Output 예시	51
[그림 3-17] 시나리오 A의 네트워크 평균통행속도(km/h)	56
[그림 3-18] 시나리오 A의 혼입률 변화에 따른 통행상태 변화	57
[그림 3-19] 시나리오 B의 차종별 지표 변화	58
[그림 3-20] 시나리오 C의 차종별 지표 변화	59
[그림 3-21] 시나리오 D의 차종별 지표 변화	60
[그림 3-22] 시나리오 A~D 비교	61
[그림 3-23] 시나리오 A~D 비교(북→남 방향)	62
[그림 3-24] 시나리오 A~D 비교(남→북 방향)	63
[그림 3-25] 시나리오 B와 GB 비교	64
[그림 3-26] 시나리오 C와 GC 비교	65
[그림 3-27] 시나리오 D와 GD 비교	66
[그림 3-28] 시나리오 E의 차종별 지표 변화	67
[그림 3-29] 지하차도 지상화 시나리오(GB, GC, GD, E) 비교	68
[그림 3-30] 전용차로 시나리오 A~D의 혼입률별 비교	70
[그림 4-1] 전용차로 운영시 교차로 좌회전 방식 예시 1	76
[그림 4-2] 전용차로 운영시 교차로 좌회전 방식 예시 2	76
[그림 4-3] 버스정류장 부 설계 예시(보도 폭 축소 가능)	77
[그림 4-4] 버스정류장 부 설계 예시(보도 폭 축소 불가능)	78

제1장 서론

1. 연구 배경 및 목적

■ 연구의 배경

- 자율주행차는 도시교통과 도시의 공간 구조를 혁신적으로 변화시킬 미래 모빌리티의 핵심으로 부상하고 있음
 - 단기적으로 주차공간, 차로변 승하차 공간, 도로 효율 향상 등에서 변화가 예측됨
 - 장기적으로는 공유교통, 수요대응형 대중교통(DRT)의 활성화, 주거지와 중심업무지역 간 위치 변화 등으로 인한 부동산 가치의 변화 역시 예측됨
- 우리 정부 역시 도시의 교통문제를 해결할 4차 산업혁명의 핵심과제로 국가차원의 기술개발 및 지원을 하고 있음(모빌리티 혁신 로드맵)
 - 2025년 완전자율주행 버스셔틀 운행, 2027년 완전자율주행 상용화를 목표로 제시
 - 인프라 측면에서도 2023년 주요 고속도로를 시작으로 2027년까지 도심 및 주요도로, 2030년 모든 도로로 자율주행차가 운행할 수 있는 환경 조성 목표
 - 2021년 말 기준 7개 도시가 자율주행차 시범운행지구로 선정되었으며, 셔틀, DRT 등 다양한 서비스를 시범 운행 중
 - 2035년까지 완전자율주행차 대중화(신차 보급률 50%)와 이를 통한 교통안전 및 혼잡 해소 구현 목표
- 그러나 3기 신도시 등 현재 건설 중인 신도시는 자율주행시스템을 고려하여 도로 및 교통 체계를 구상하지 않아, 자율주행차의 운행을 위해 도로 네트워크 등에 대한 검토가 필요
 - 3기 신도시의 목표 입주 시기는 2026년(인천계양지구)부터이며, 실제 완전한 입주가 마무리되는 것은 2030년경으로 예상
 - 정부 목표를 기준으로 2030년에는 완전자율주행을 위한 기반 여건이 조성되어야 함
- 더불어 일반차량과 자율주행차량의 혼입 운행 상태가 오랜 동안 지속될 것이므로 이에 대한 고려가 필요

- 자율주행차와 일반차량이 혼입 상태로 운행 될 경우 도로 네트워크 상에서의 상충 등 다수의 문제가 일정기간 발생할 가능성이 높음
- 이에 2022년부터 신도시를 대상으로 자율주행차의 운행과 관련된 연구를 수행
 - 1차 연구에서는 자율주행차와 관련된 기술, 자율주행차 활성화 전망, 필요 인프라와 도입시기, 그리고 3기 신도시(고양창릉)을 대상으로 한 예상 문제점 도출을 수행
- 현재 자율주행차의 도입이 안전과 사회적 수용 측면에서 도전받고 있어 잠시 정체됨
- 이에 자율주행차가 그 기능을 발휘하기에 여건이 더 좋은 고속도로 전용차로를 도입 하는 프로젝트가 부상하고 있음
 - 우리나라는 2024년부터 고속도로에서 자율주행 전용차로 도입하고 화물차의 자율군집주행 등의 기술을 실증 진행
- 그리고 일부에서 자율주행 전용차로를 도심도로에 적용하는 것 역시 제안 및 검토되고 있음
- 따라서 새로운 인프라를 도입할 여건이 더 좋은 신도시를 대상으로 전용차로를 도입에 대한 사전 검토 및 연구가 필요

■ 연구의 목적

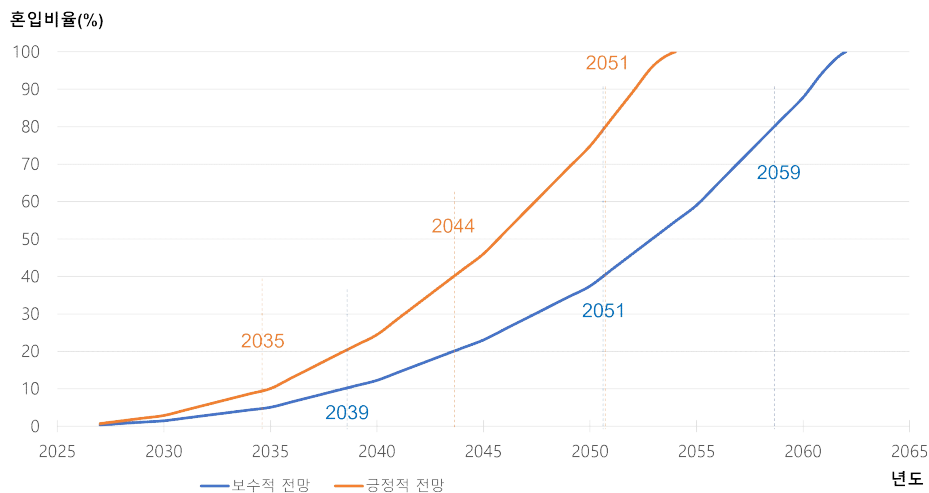
- 본 연구는 모두 3단계(3년)로 구성되어 있으며, 2023년의 연구는 2단계 연구임
- 1단계 연구에서는 기존 연구를 바탕으로 개선 및 도입이 필요한 물리적 인프라에 대한 검토, 자율주행차 운행 시 3기 신도시에서 발생할 수 있는 예상 문제점 파악과 관련 모델링을 위한 사전 준비를 진행함
- 2023년의 2단계 연구의 목적은 다음과 같음
 - 자율주행 전용차로의 필요성 및 효과 분석
 - 자율주행 전용차로 도입 필요 시 도입 시기 및 조건 도출
- ※ 전용차로의 도입을 위한 검토와 더불어 1차 연구의 주 문제구간인 지하철도의 진출입부의 일반차와 자율주행차 간의 상충 문제 역시 고려함

2. 연구의 범위 및 수행 계획

2.1. 연구의 범위

■ 시간적 범위

- 2단계에서 진행할 전용차로의 경우 자율주행차와 일반차가 혼입 운행되는 시기에 적합
 - 세부적으로는 자율주행차가 주류가 되면 전용차로의 의미가 없어지므로 혼입률 60% 정도를 목표로 함
 - 1차 연구에서 제시한 국내 자율주행차 전망에 따르면 혼입률 60%가 달성하는 시기는 2048년(긍정적 전망)~2055년(보수적 전망)으로 추정함
 - 본 연구는 자율주행차의 상용화 및 3기 신도시의 입주가 시작하는 2026년에서 보급률 60%를 달성할 것으로 예상되는 2055년을 분석의 시간적 범위로 함
 - 3기 신도시의 입주는 2026년 인천계양지구를 시작으로 2029년까지 순차적으로 이루어짐
- ※ 자율주행차 관련 연구는 년도보다는 혼입률이 더 중요하며 자율주행차의 점진적 증가에 맞춰 수요 및 인프라 변화, 도시 공간 변화에 대해 살펴보는 것이 중요



[그림 1-1] 국내 자율주행차 혼입비율(MPR) 전망

자료 : 신도겸 외(2023)

■ 공간적 범위

- 연구의 공간적 범위는 1차 연구와의 연속성을 고려하여 3기 신도시 중 고양창릉지구로 함

■ 내용적 범위

- 본 연구는 자율주행차와 일반차량의 혼입 운행 상태를 연구의 주 대상으로 함
 - 주 검토 구간은 혼입률 10%~60%
- 연구에서 고려하는 자율주행 교통수단은 도로기반 교통수단으로 한정
 - 승용차와 버스(BRT)
- 물리적 인프라로 한정하고, 통신장비 등의 디지털 인프라는 검토 대상에서 제외
- 신도시를 대상으로 하므로 도시의 단속류 교통흐름에 대한 연구로 한정
- 본 연구는 2022년~2023년에 걸쳐 단계적으로 수행하는 연구이며, 2023년의 2단계의 연구 범위는 다음과 같음
 - 자율주행전용차로의 필요성 및 효과 분석, 설치 방향

2.2. 주요 연구 내용

- 자율주행 전용차로에 대한 기존 연구 및 설치 사례 조사
- 자율주행 전용차로 설치 및 운영 시나리오 작성
 - 버스전용차로를 이용한 공유, 1차로, 가로변 차로 활용 등 시나리오 검토
- 분석 결과에 따른 개선 대안 시나리오 작성
 - 전용차로 효과 분석 결과에 따라 개선 대안을 작성
- 전용차로 설치·운영 시나리오별 효과 분석 및 개선 대안 모델링
 - 3기 신도시를 대상으로 시나리오에 따라 전용차로를 설치했을 때의 효과 분석
- 신도시 대상 자율주행 전용차로 운영 방향 제시
 - 시뮬레이션 결과를 바탕으로 적합한 전용차로 운영 방안을 모델링 지역인 고양창릉과 일반적인 신도시로 구분하여 제시

2.3. 연구 수행 방법

■ 선행 연구 및 문헌 자료 조사

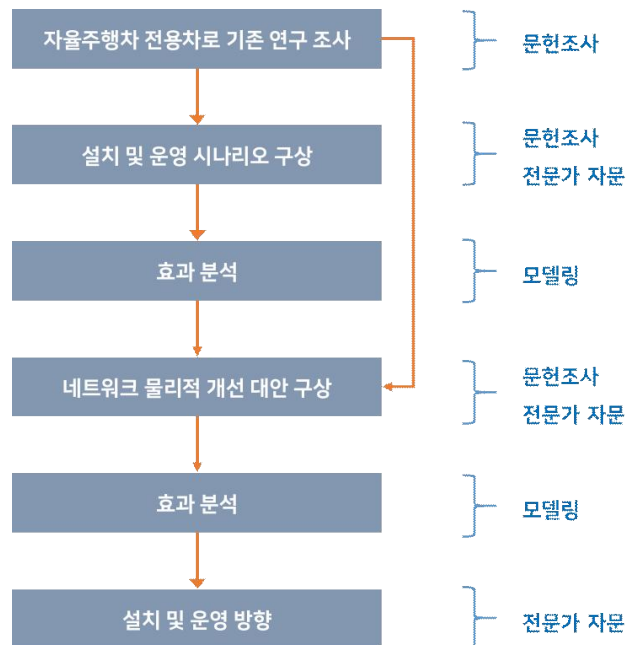
- 자율주행 전용차로에 대한 기존 연구 및 설치 사례 조사

■ 전문가 그룹 및 관련 기관 자문

- 자율주행 전용차로 설치 및 운영 시나리오 작성
- 전용차로 효과 분석 결과에 따라 개선 대안을 작성
- 신도시 대상 자율주행 전용차로 운영 방향

■ 마이크로 시뮬레이션 수행

- 전용차로 설치·운영 시나리오별 효과 분석 및 개선 대안 모델링



[그림 1-2] 연구 수행방법

제2장 선행연구 고찰

1. 자율주행 전용차로의 효과

1.1. 기존연구의 개요

- 고속도로 및 자동차 전용도로와 같은 연속류 도로는 차량이 멈춰야 하는 경우가 적어 자율주행 전용차로의 효과가 클 것으로 예상되어 일찍부터 주목받고 연구됨
- 반면 도심도로(단속류)를 대상으로 하는 연구는 초기단계
- 연구의 목적은 다음과 같음
 - 교통류 개선 효과 분석(차량 흐름 상태 분석)와 타당성
 - 전용차로 설치 기준
 - 전용차로 설치 위치 또는 합류부와 분류부의 설치 기준
 - ※ 전용차로 설치 기준과 교통류 개선 효과가 완전히 별도로 연구되기 보다는 상호 연관을 가지고 연구됨
- 연구의 방법론은 모두 시나리오를 설정하고 모델링을 통해 효과를 검증하는 방식으로 수행하였으며, 마이크로 모델을 사용함
 - 모델링 패키지로는 VISSIM, AIMSUN, NGSIM²⁾등이 다양하게 사용됨
 - VISSIM의 차량추종모형(car-following model) : Wiedemann 99
 - AIMSUN의 차량추종모형(car-following model) : Gipps model
 - 자율주행 수준은 Lv4를 다수가 설정하였으며, 일부 Lv3를 혼용하여 채택
- 연구 대상은 가상의 고속도로 또는 실제 고속도로의 특정 구간을 설정하여 수행
 - 일반적으로 합류부와 분류부를 가진 직선구간을 채택
- 분석결과를 보여주는 분석척도는 다수가 지점 측정값을 활용하여 결과 도출
 - 효율성 척도 : 교통량(차로별, 평균, 통과), 속도(차로별, 공간평균), 밀도, 통행시간(평균), 지체시간(평균)

2) Next Generation Simulation

- 안전성 척도 : 상충횟수, TTC(Time to Collision), 차량 정지횟수, 차로 변경 횟수

1.2. 연속류 대상 주요 연구

1) 고속도로 자율주행 전용차로 설치 시 교통류 개선 효과평가 연구(2022)³⁾

■ 목적

- 고속도로에서 자율주행 전용차로 도입 시점을 판단
- 안전성과 효율성을 고려한 효과지표를 사용하여 자율주행 전용차로 도입에 대한 효과 분석

■ 시뮬레이션 환경

- 왕복 6차선의 가상의 고속도로 구간 설정
- VISSIM을 활용하였으며, Wiedemann 99 모형 사용
- Lv4 수준의 자율주행 적용하였으며, 주행변수는 선행연구 제시 값 준용

■ 분석척도

- 교통량, 공간평균속도, 밀도, 상충횟수의 총 4개의 평가지표 사용

■ 결과

- 혼입율이 30~40%일 경우 자율주행 전용차로 설치 가능할 것으로 판단함
 - 혼입율 20% 이하 : 일반 차로에 교통량이 과집중되어 차량이 네트워크에 진입 불가
 - 혼입율 50% 이상 : 자율주행 전용차로에 교통량이 과집중되어 차량이 네트워크에 진입 불가
 - 합류구간의 경우 자율주행 전용차로가 없는 경우가 효율성 및 안전성 측면에서 가장 우수하므로 전용차로 도입 시 합류구간의 주행관리 전략 필요
 - 분류구간의 경우 중앙차로에 자율주행 전용차로를 설치하는 것이 가로변차로보다 효율성 및 안전성 측면에서 유리한 것으로 나타남

3) 백성채 외 2인(2022), 한국ITS학회 2022년 추계학술대회 논문

2) 자율주행 전용차로 도입에 따른 고속도로 교통류 영향(2021)⁴⁾

■ 목적

- 자율주행차 혼입률(MPR :Market Penetration Rate)별 효율성 및 안전성에 따른 최적 전용차로 설치방안 도출
- 추후 자율주행차가 상용화될 때 효율성 및 안전성을 극대화할 수 있는 전용차로 설치방안 마련

■ 시뮬레이션 환경

- 유입부와 유출부(간격 400m)를 가진 총 연장 8km의 국내 고속도로 환경과 유사한 가상의 왕복 4차로 고속도로 설정
- 정체 시 전용차로의 효과를 파악하기 위해 LOS E 수준의 교통량 사용
- 차종은 버스전용차로제 운영 구간인 경부고속도로 오산 IC ~ 한남대교 남단의 2019년 차종 구성비로 구성
- VISSIM을 활용하였으며, Wiedemann 99 모형 사용
- Lv4 수준의 자율주행 적용하였으며, 주행변수는 선행연구 제시 값 준용
- 전용차로 설치에 대한 3가지 시나리오를 제시
 - 시나리오 1 : 자율주행차와 일반 차량의 혼재 운영(전용차로 미설치)
 - 시나리오 2 : 버스전용차로를 활용하여 버스와 자율주행차의 혼재 운영
 - 시나리오 3 : 자율주행 전용차로 도입

■ 분석척도

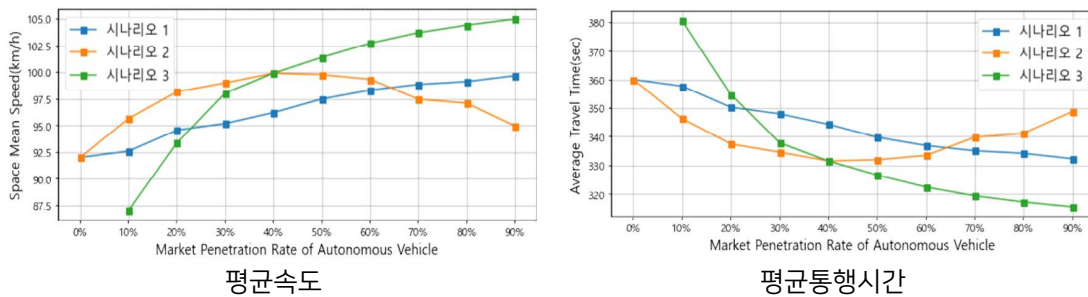
- 효율성 척도 : 공간평균속도와 평균통행시간
- 안전성 척도 : TTC(Time to Collision)

■ 결과

- 최적의 전용차로 도입 방안을 혼입률에 따라 제시함
 - 혼입률 10%~20% : 버스와 혼재 운영(시나리오 2)

4) 김종효 외 (2021), 대한교통학회 제84회 학술발표회 논문

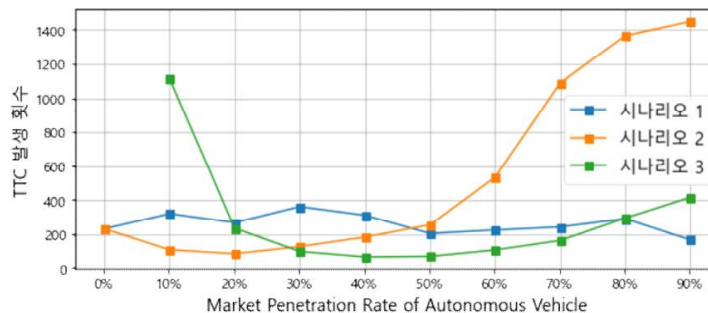
- 혼입률 30%~70% : 전용차로 설치(시나리오 3)
- 혼입률 70% 이상 : 효율측면에서는 전용차로 설치, 안전 측면에서는 전용차로를 설치하지 않고 자율주행차와 일반차량을 혼재 운영
- 자율주행차가 도입됨에 따라 평균통행속도가 증가하고, 평균통행시간이 감소하여 효율성의 증가함
- 시나리오 1과 3에서는 지속적으로 효율성이 증가
- 시나리오 2 (버스와 자율주행차 혼용)에서는 MPR이 40~50% 정도가 되면 효율이 감소



[그림 2-1] 시나리오별 통행 효율 지표 변화

자료 : 김종효 외 (2021)

- 안전성 측면에서는 전반적으로 혼입률이 증가하면 안전성이 증가하였으나, 시나리오 2(버스와 혼재 운영)에서는 혼입률 50% 이후 충돌 발생 가능성 지표(TTC)가 급격하게 증가함



[그림 2-2] 시나리오별 충돌발생 가능성 지표 변화

자료 : 김종효 외 (2021)

3) 고속도로 엇갈림구간 자율주행 전용차로 교통류 개선 효과평가 연구(2023)⁵⁾

■ 목적

- 고속도로 엇갈림구간에 자율주행 전용차로를 도입했을 때, 전용차로 운영전략별 도입 효과와 차로변경구간 증감에 따른 효과 확인

■ 시뮬레이션 환경

- 중부내륙고속도로 낙동JC(내서TG방면)를 선정
 - 본선 3차로, 연결로 1차로, 엇갈림구간 4차로, 엇갈림구간 길이 120m
- VISSIM을 활용하였으며, Wiedemann 99 모형 사용
- Lv4 수준의 자율주행 적용하였으며, 주행변수는 선행연구 제시 값 준용하였으며, 승용차만을 대상으로 함
- AV 혼입률은 0~60%까지 10% 간격 증가
- 전용차로 운영전략을 5가지로 설정
 - 전용차로(DL, Dedicated Lane) 없음
 - 혼용차로(ML, Mixed Lane)와 일반차로 구성
 - 전용차로(DL, Dedicated Lane)와 혼용차로(ML, Mixed Lane) 구성
 - 전용차로(DL, Dedicated Lane)와 일반차로 구성
 - 군집주행이 가능한 전용차로(DL, Dedicated Lane)와 일반차로 구성

■ 분석척도

- 밀도, 속도, 교통량 비교 분석

■ 결과

- 차로변경구간의 길이를 변경하여도 운영전략에 따른 개선효과(밀도, 속도, 교통량)에 차이가 없음
- 교통량이 적을 경우(1,300vph) 혼잡이 발생하지 않아 차이가 없음

5) 백성채 외(2023), 한국ITS학회 추계학술대회 논문

4) 자율주행 차량 전용차로 도입의 시뮬레이션 기반 효과분석(2018)⁶⁾

■ 목적

- 자율주행차와 일반차의 혼입 운영시기를 대비한 효과적인 자율주행 전용차로 운영 방안 제시

■ 시뮬레이션 환경

- 경부고속도로 안성 JC 상습 정체 시작 구간 대상(편도 3차로 부산 → 서울 구간)
- Aimsun을 활용하였으며, Gipps 모형 사용
 - 5개 변수(반응시간, 최소 차량 이격 거리, 속도 수용성, 공격성, 민감도)를 활용하여 자율주행 차량의 움직임을 모사

[표 2-1] 일반차와 자율주행차 모사를 위한 변수 설정값 비교

구분	반응시간(s)	최소 이격거리	속도 수용성	공격성	민감도
일반 차량	1.1~1.4	1.5	0.9~1.2	-0.2~0.2	0.8~1.2
자율주행 차량	0.6~0.8	1.3	0.9~1.1	0~0.3	0.9~1.1

자료 : 유화평 외 (2018)

- 자율주행차 혼입률, 전용차로 설치 위치, 개수로 시나리오를 구분
 - 전용차로 없이 차량 혼재 상태(혼입률 05~100%)
 - 좌측 1개 차로 또는 우측 1개 차로에 전용차로 설치(혼입률 0%~70%)
 - 좌측 2개 차로 또는 우측 2개 차로에 전용차로 설치(혼입률 30%~100%)

■ 분석 척도

- 효율성 척도 : 평균 속도, 평균 통행시간, 평균 지체시간
- 안전성 척도 : 차량 정지횟수, 차로 변경 횟수

■ 결과

- 자율주행차 도입 초기인 혼입률 30%까지는 우측 1개 차로에 전용차로를 배치하는 것이 효과적

6) 유화평 외(2018), 한국ITS학회 춘계학술대회 논문

- 혼입률 30%~70% 시기에는 전용차로 없이 일반차와 혼재 운행
- 혼입률 70% 이상에서는 좌측 2개 차로에 전용차로를 배치하는 것이 효율성과 안전성 측면에서 좋음

평가 측면		자율주행차량 및 일반차량의 혼재기											자율주행차량만
		자율주행차량의 혼입률											
		도입 단계			활성화 단계					안정화 단계			
		0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	99%	100%
효 율 성 측 면	평균 속도, 통행시간	우측 전용차로			전용차로 무(혼재 사용)					좌측 전용차로 2개			모든 차로 자율주행 전용차로
	지체 시간	전용차로 무(혼재 사용)								좌측 전용차로 2개			
안 전 성 측 면	평균 정지횟수	우측 전용차로		전용차로 무(혼재 사용)						좌측 전용차로 2개			
최종 결과													
효율성 및 안전성 향상방안		도입 단계			활성화 단계					안정화 단계			모든 차로 자율주행 전용차로
		우측 전용차로			전용차로 무(혼재 사용)					좌측 전용차로 2개			

[그림 2-3] 시나리오별 분석 결과

자료 : 유화평 외 (2018)

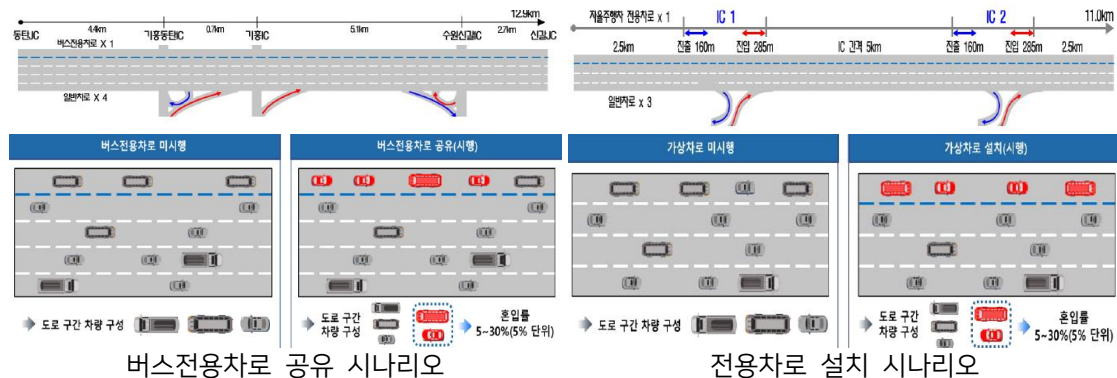
5) 자율주행 전용차로 도입 타당성 분석 방법론 연구(2022)⁷⁾

■ 목적

- 자율주행 전용차로 도입 시 설치방안 제시

■ 시뮬레이션 환경

- 자율주행 전용차로 설치 방식 따른 2가지 시나리오 설정하였으며, 시나리오에 따라 각 다른 도로 네트워크 사용
 - 기존 고속도로 버스전용차로 공유 시나리오
 - 경부선 동탄JCT에서 신간 JCT 12.9km 구간
 - 편도 4차로 고속도로에 전용차로 도입 시나리오
 - 좌측(중앙차로) 1차로에 전용차로를 설치하는 편도 4차로의 가상의 고속도로
- VISSIM을 활용하였으며, Wiedemann 99 모형 사용



[그림 2-4] 시나리오별 모델링 네트워크와 차량 구성

자료 : 김수희 외(2022)

■ 분석척도

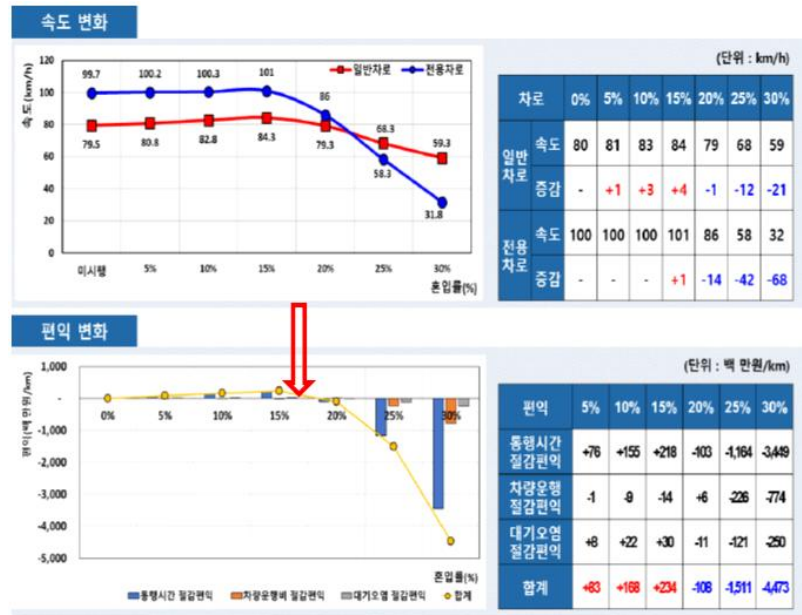
- 통행속도, 편익(통행시간 절감, 차량운행 절감, 대기오염 절감)

■ 분석 결과

- 자율주행차가 고속도로 통행량의 20% (혼입률 20%) 까지는 버스전용차로를 공유하는 방식이 효과적

7) 김수희 (2023), “고속도로 자율주행 대응 여건 및 시사점”, 2023년 자율주행 공청회 발표자료, 2023.11.07.

- 20%가 넘어가면 버스전용차로 차량 전반의 통행속도가 줄고 운전자 편익도 마이너스로 전환됨

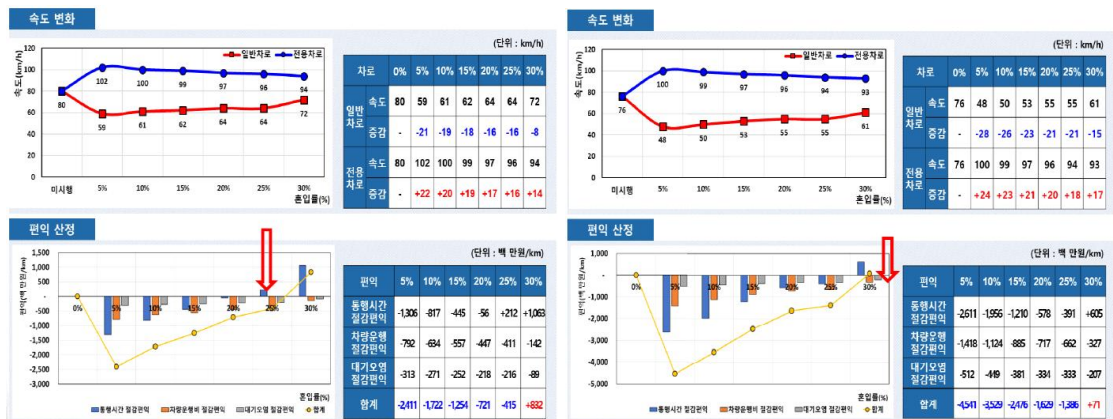


[그림 2-5] 버스겸용전용차로의 효과

자료 : 김수희 외(2022)

- 혼입률 30% 이상에서는 전용차로 별도 사용이 효과적

- 전용차로 도입 초기엔 일반차로의 통행속도가 줄지만, 자율주행차가 증가하여 30%를 넘긴 이후엔 양 도로에 차량이 적절히 나뉘면서 편익이 플러스로 전환됨
- 진출입 차량이 시간당 1,200대인 경우 자율주행차 분기구간에 동적 제어 필요



진출입 600대/시

진출입 1,200대/시

[그림 2-6] 독립 전용차로의 효과

자료 : 김수희 외(2022)

6) Investigating the Effects of Reserved Lanes for Autonomous Vehicles on Congestion and Travel Time Reliability(2017)⁸⁾

■ 분석목적

- 자율주행 전용차로가 교통의 흐름 및 통행시간에 미치는 잠재적인 영향을 분석

■ 시뮬레이션 환경

- 2가지 모델링 환경을 구현
 - 가상의 고속도로(2차로 고속도로, 약 3km 구간)
 - 자율주행차 혼입률 10%, 25%, 50% 적용
 - 일리노이주 시카고 I-290 고속도로(4차로 5.6km)
 - 자율주행차 혼입률 10%, 20%, 30% 적용
- NGSIM(Next Generation Simulation) 활용
- 3가지 시나리오 제시
 - 전용차로를 의무적 사용하는 경우(forced everywhere)
 - 자율주행차가 전용차로 이용 시에는 자율주행, 일반차로 이용 시에는 운전자가 운전하는 경우(forced reserved)
 - 자율주행차는 일반차로/전용차로 선택적으로 사용(optional everywhere)
- 최좌측 차로(중앙차로)를 자율주행 전용차선으로 가정

■ 분석 척도

- 혼잡도, 통과 교통량, 통행시간

■ 결과

- 가상의 2차선 고속도로에서는 혼입률 50% 이상, 시카고의 4차선 고속도로에서는 혼입률 30% 이상에서 전용차로 도입 시에 통과교통량이 증가
 - 전용차로의 도입으로 기존 차로 수가 감소하여 교통혼잡을 유발
- 일반차로/전용차로를 선택적 사용하는 경우(시나리오 3)에는 효과가 좋음

8) Talebpour et al.(2017), Journal of the Transportation Research Board

- 혼입률이 30% 이상에서 교통혼잡 감소 및 통과 교통량 증가
- 통행시간의 분산을 줄이고 신뢰성 향상에 기여

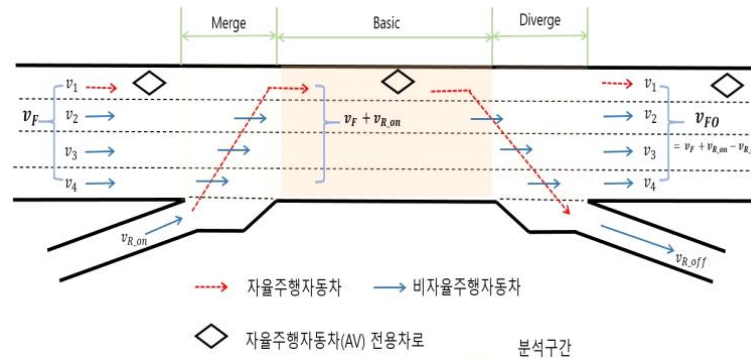
7) 고속도로 자율주행차 전용차로 기준설정에 관한 연구(2021)⁹⁾

■ 목적

- 자율주행차와 일반차의 혼재 시 안전 향상과 원활한 소통을 위해 자율주행 전용차로 도입 기준

■ 시뮬레이션 환경

- 3.5~4.5km의 4차선 가상의 고속도로를 대상
- Lv4 이상의 자율주행기능을 가진 승용자동차만 대상



[그림 2-7] 자율주행 전용차로 분석 구간

자료 : 김범일(2021)

- VISSIM (Wiedemann 99 모형)을 교통흐름을 분석하고, SSAM을 활용하여 안전을 분석
- 혼입률과 기본구간 교통량, 합류부 교통량, 분류부 진출 차량 비율, 차로 수 등으로 구분하여, 총 6가지의 전용차로 기준설정 시나리오 구성

■ 분석 척도

- 안전성 지표 : TTC
- 효율성 지표 : 통과 교통량, 교통량 대 용량비(V/C)

9) 김범일(2021), 서울대학교 대학원 환경계획학과 박사학위논문

■ 결과

- 안전성과 효율성 결합모형(CM)에 적용하여 혼입률과 교통량에 따른 적정 전용 차로 수와 전용차로 설치기준 교통량 제시
- 혼입률이 증가하면 설치기준 교통량은 감소하고, 전용차로 수가 증가하면 설치 기준 교통량도 증가
- 도로용량편람(2013)의 서비스 수준(LOS)과 비교하면, 교통상황별 차로 수는 다르지만, LOS D에서의 전용차로 수는 1차로 또는 2차로 설치가 필요하며, LOS E 이상에서는 전용차로 3차로가 필요

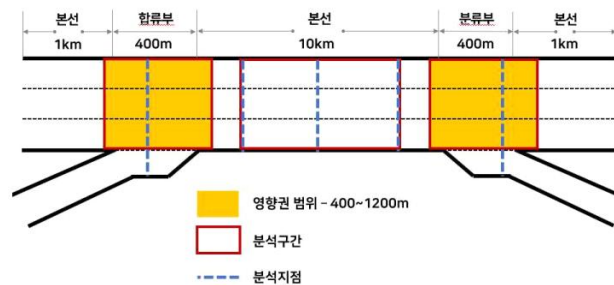
8) 고속도로 자율주행 전용차로 도입 시 혼합교통류 특성 분석 시나리오 개발 연구(2021)¹⁰⁾

■ 분석목적

- 자율주행차 도입에 따른 이상적인 교통류, 현재와 유사한 교통류 등 다양한 시나리오를 구축하여 이동성 측면에서 자율주행 전용차로의 효과 측정

■ 시뮬레이션 환경

- 12.8km의 편도 3차선 가상의 고속도로



[그림 2-8] 분석 대상 및 구간

자료 : 김형준(2022)

- VISSIM을 활용하였으며 차량추종모형은 Widemann 99 사용
- 안전거리를 준수하는 Cautious Model과 VISSIM의 기본 모델인 Normal Model로 자율주행차 구현

10) 김형준 외 (2022), 대한교통학회 학술지.

- 분석구간은 전체 10km 구간 중 5km를 설정하고, 3개 지점에서 수집한 데이터의 평균값을 사용
- V2X 기반의 자율협력주행이 가능한 차량만을 대상으로 함
- 전용차로 1차로 도입, 전용차로 3차로 도입, 전용차로 없음의 3가지 설치 가정
 - 자율주행 전용차로가 ‘1차로’ 또는 ‘3차로’인 경우 자율주행차는 전용차로에서만 군집 주행 가능
 - 자율주행 승용차는 전용차로 이외 차로로도 통행 가능하도록 설정하고, 자율주행 화물차는 전용차로만 통행하는 것을 원칙
 - ‘전용차로 없음’에서는 군집주행을 구현하지 않음

■ 분석 척도

- 차로별 교통량, 차로별 속도, 평균 교통량, 공간평균속도
- 분석구간은 전체 10km 구간 중 5km를 설정하고, 3개 지점에서 수집한 데이터의 평균값을 사용

■ 결과

- 합류부와 분류부에서 자율주행 전용차로 도입 시 LOS와 MPR이 증가할수록 교통류를 악화시켜 지체가 발생하며, 교통량이 감소
- 합류의 영향으로 본선에서도 일부 교통량이 감소
- LOS D~E, MPR 10~20% 구간에서는 전용차로 도입 시 전용차로 이외 차로가 과포화되는 현상이 발생
- 군집주행을 하지 않는 ‘전용차로 없음’이 이동성 측면에서 가장 우수
- 자율주행 전용차로 도입에 따른 악영향은 LOS D~E, MPR 10~20% 구간에서 가장 두드러짐
- 전용차로를 도입한다면 3차로 도입이 1차로 도입보다 이동성 측면에서 더 효과적

1.3. 단속류 대상 주요 연구

- 1) 교통 시뮬레이션을 활용한 자율주행 단계에 따른 도로 네트워크 성능 변화 분석(2023)¹¹⁾

■ 분석목적

- 도심지 내의 실제 도로 구간을 대상으로 자율주행 전용차로 도입에 따른 효과를 분석

■ 시뮬레이션 환경

- 대전시의 주간선도로 인 한밭대로의 일부구간
 - 4.4km 구간 10개 교차로 포함
 - 첨두시 교통량이 많고 다양한 차로 수로 이루어져 있으며, 신호 교차로와 버스 정류장 등의 요소들이 적절히 배치됨
- VISSIM을 활용하였으며, 차량추종모델은 Wiedemann 74 사용
 - 일반 차량의 경우 VISSIM 기본 제어변수 값을 사용하되 전방 및 후방 주시거리의 설정값을 보다 현실성 있게 하향 조정
- 자율주행차 혼입률이 0%~100%까지 10%씩 증가하는 상황을 가정
- 자율주행차의 혼입률이 증가함에 따라 차로수에 따라 전용차로의 수를 늘임

■ 분석 척도

- 도로의 링크 시작 지점을 기점으로 하여 교차로를 통과하는 링크의 끝 지점을 종점으로 두 구간에 검지기를 설치
- 평균 통행속도, 평균 지체시간

■ 결과

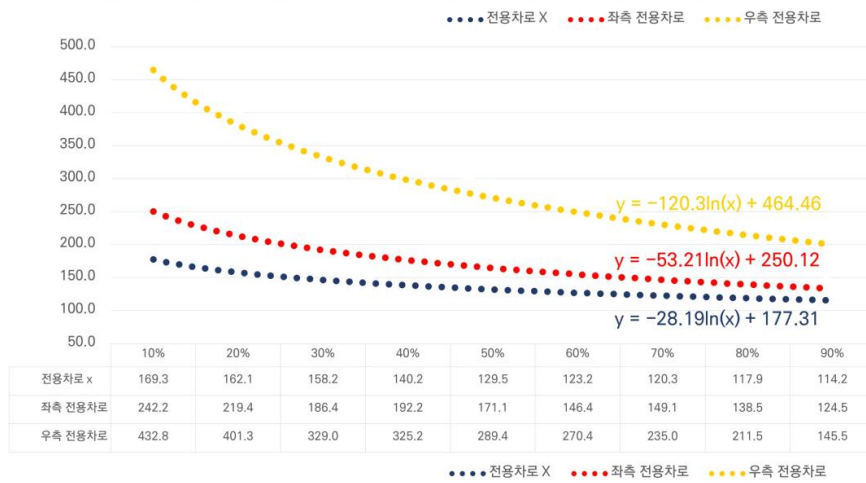
- 평균 통행속도 및 지체시간 모두 일반 차량과 자율주행차가 혼재되어 주행하는 상황이 가장 양호한 통행상태를 보임
- 설치한다면 좌측, 우측 순으로 전용차로를 설치했을 때 양호

11) 백주호(2023), 한밭대학교 석사학위논문

평균
통행
속도



평균
지체
시간



[그림 2-9] 전용차로 시행에 따른 전체 네트워크 속도 및 지체시간 비교
자료 : 백주호(2023)

2) Evaluations of Managed Lane Strategies for Arterial Deployment of Cooperative Adaptive Cruise Control(2017)¹²⁾

■ 분석목적

- 자율주행 전용차로 및 CACC 기술 도입 시나리오에 따른 효과를 분석

■ 시뮬레이션 환경

- 버지니아주 페어팩스 카운티의 편도 2차로의 연장 약 3마일의 간선도로
- VISSIM을 활용 / CACC 모형
- 혼입률은 10%에서 90%까지 10%씩 증가
- 차로 운영 전략을 3가지로 구분
 - 일반차량과 혼재되는 경우(mixed-traffic)
 - 특정 차선에 일반차량과 혼재되는 경우(restricted CACC lane)
 - 전용차로(dedicated CACC lane)
- 전용차로의 위치를 좌측과 우측으로 구분

■ 분석 척도

- 평균 정지지체, 평균속도, 교차로 통과 교통량

■ 결과

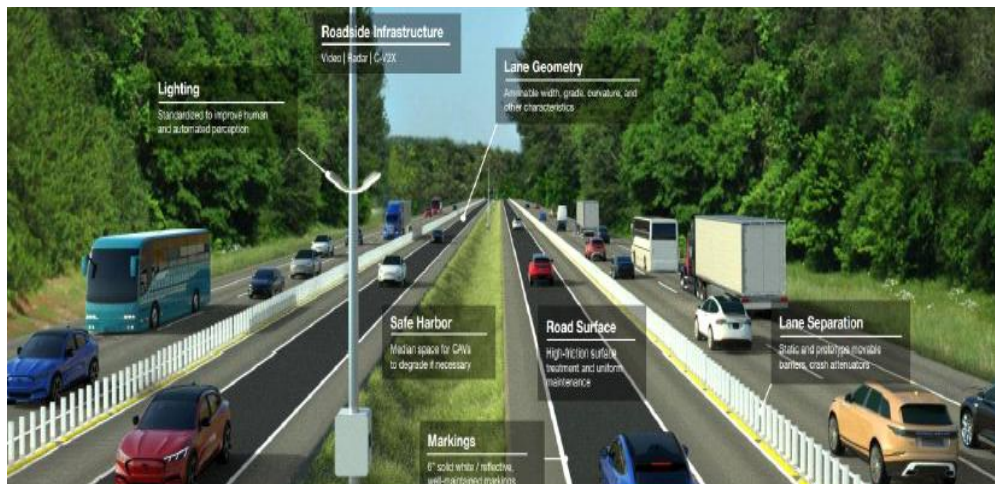
- 혼입률 50% 이하에서는 자율주행차와 일반차 혼재 시나리오의 평균속도가 높음
- 혼입률 50% 이상이면 전용차로 시나리오의 평균속도가 높음
- 혼입률 40% 이하에서는 자율주행차와 일반차 혼재 시나리오가 통과 교통량이 많음
- 혼입률 40~70%에서는 모든 시나리오에서 통과 교통량이 많음
- 혼입률 40% 이하에서 전용차로 도입은 적합하지 않음

12) Zhong et al.(2017) presentation for the TRB Annual Meeting, January 2017.

2. 자율주행 전용차로 설치계획 및 사례

■ 미국

- 미국에서 자율주행차 도입에 가장 적극적인 주 가운데 하나인 미시간주가 그 해답을 자율주행 전용차로에서 찾고 이를 구축하기 위한 프로젝트를 시작하였음
 - 전통의 자동차공업 도시인 디트로이트와 인근 대학도시 앤아버를 잇는 64km의 미시간 애비뉴와 94번 고속도로에 자율주행차 전용 2개 차로(왕복) 건설

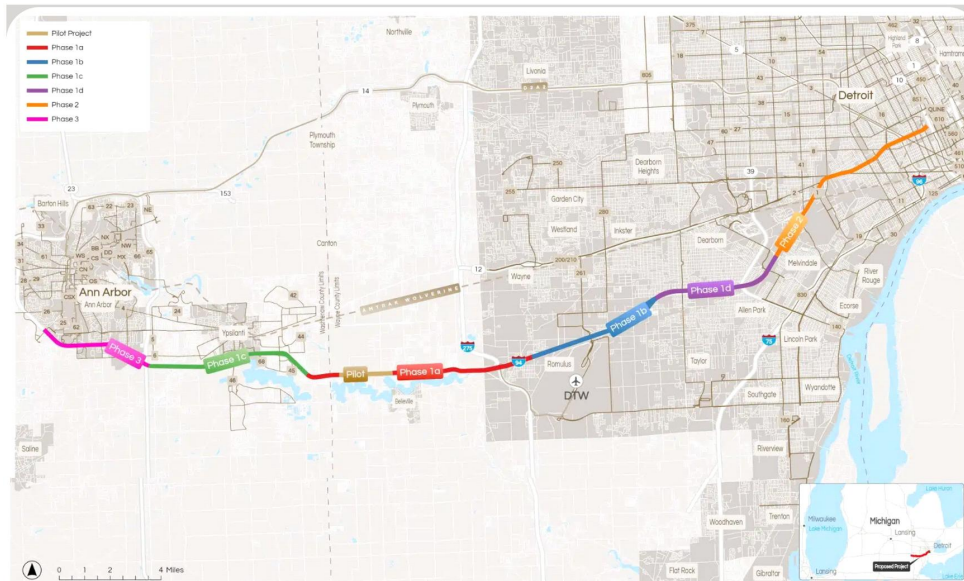


[그림 2-10] Cavnue 미래상

자료 : CAVUE 홈페이지, <https://www.cavnue.com/>, 2023.11.26. 읽음

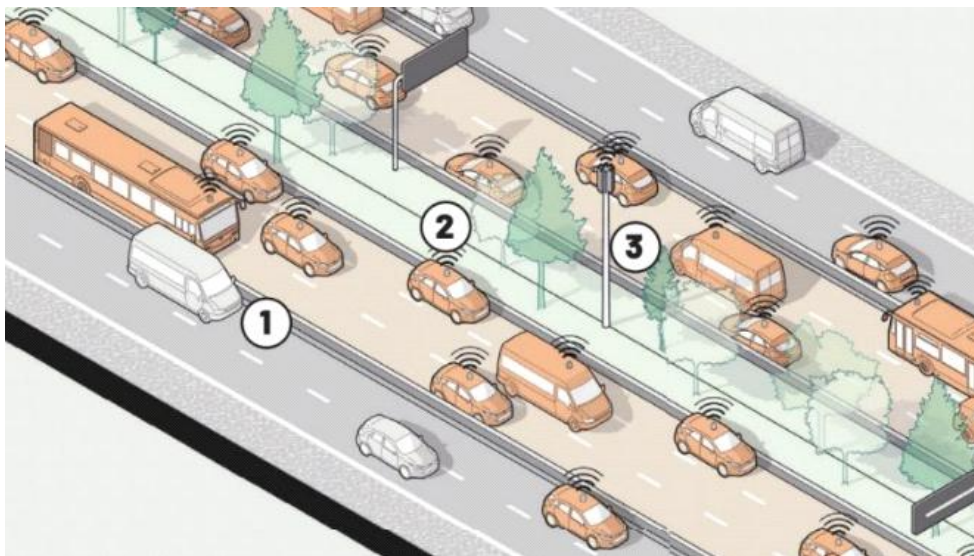
- 이를 위해 미시간주 상원은 지난해 공공도로의 일정한 구역을 ‘자율주행차량 도로’로 지정하는 법안(SB706)을 만들었음
- 이 도로는 미시간대, 디트로이트공항, 미시간중앙역을 비롯한 주요 거점을 연결할 뿐 아니라 기회구역(Opportunity Zones)이라는 이름의 개발지역 10여곳 통과
- 2020년 8월에 시작된 이 프로젝트는 카브뉴라는 도로교통시스템 구축업체가 주도하고 있음
 - 카브뉴(cavnue)는 자동차(Car)와 애비뉴(Avenue)를 합친 단어로 구글에서 분사한 사이드워크 인프라스트럭처 파트너스의 자회사임
 - 카브뉴가 건설할 도로에는 와이파이를 비롯한 통신 인프라와 라이다, 카메라 등 자율주행에 필요한 시설들이 설치되며, 해당 시설들과 무선 통신 시스템이

장착된 자율주행차, 그리고 중앙 관제센터의 컴퓨터를 연결하는 교통 시스템을 구축하면 정체 없는 자율주행차로를 운영할 수 있다고 생각하고 있음



[그림 2-11] Cavnue 대상 구간

자료 : CAVUE 홈페이지, <https://www.cavnue.com/>



[그림 2-12] HOV와 자율주행 전용차로 미래상

자료 : TNW (2022)

■ 중국

- 2019년부터 건설중인 베이징 남서쪽 신도시 숭안신구와 베이징을 잇는 100km 길이의 징송고속도로 존재
- 교통당국은 왕복 8차로 가운데 중앙 2차로를 자율주행 전용차로로 배정



[그림 2-13] 중국 징송고속도로의 자율주행 전용차로(가운데 녹색차로)

자료 : 한겨레신문(2022.04.01.)

- 베이징~허베이구간은 지난해 5월 개통했고, 나머지 구간은 올해 말 개통 예정임
 - 이 도로에는 무선통신망을 통해 운행 데이터와 도로 정보를 수집하는 지능형 교통 인프라 시스템 설치
 - 자율주행 시스템이 제대로 작동하려면 무엇보다 낮밤이나 날씨에 상관없이 도로표지판을 정확히 식별할 수 있어야 하기 때문에 징송고속도로에는 3,700개 이상의 엘이디(LED) 스마트 가로등 설치(가로등에는 조명과 함께 각종 센서와 카메라 등의 장치 통합)



[그림 2-14] 징송고속도로에 설치된 스마트 가로등

자료 : 界面新闻(2021.05.14.)

■ 일본¹³⁾

- 일본은 자율주행 전용차로를 수도권과 나고야 주변 지역을 잇는 신토메이고속도로의 시즈오카현 일부 구간에 설치 예정
 - 하마마쓰 휴게소 ~ 스루가완누마즈 휴게소 약 115km 구간 대상(세계 최초 장구간)



자율주행 전용차로 구간



전용차선에서 시험운행에 성공한 자율주행 화물차

[그림 2-15] 신토메이고속도로 자율주행 전용차로 계획

자료 : (좌) 日本経済新聞(2023.3.31); (우) 로보스타(2019.6.11)

- 편도 3차로 구간으로 곧게 뻗은 구간이 많고 차량정체가 적어 자율주행에 적합 판단
- 일정 간격으로 센서와 카메라를 설치하고 노면과 차량 상황을 실시간으로 파악하고 지도나 3차원 공간 데이터베이스와 연결하여 안전운행에 필요한 정보제공
- 주로 밤에 운행하는 트럭의 Lv4 수준(거의 완전자율주행)의 실증 및 실용화 계획
 - 2024년 4월부터 시작하는 트럭 운전사의 시간 외 노동 규제(연 960시간)로 인한 물류 분야의 영향을 최소화하기 위한 정책의 일환

13) 오피니언뉴스(2023.03.31.)

3. 시사점

1) 연속류의 자율주행차 전용도로에 대한 기존연구

- 대부분 연속류 위주의 연구가 진행되었으며, 가상의 도로구간 또는 실도로 구간을 대상으로 분석을 수행하였으나, 전반적으로 가상도로가 다수
- 효과적도는 교통량, 속도, 밀도, 상충횟수 등으로 다양함
- 분석 결과 역시 기하구조 구성, 분석 조건에 따라 다양함
 - 혼입률 10~20%에서는 전용차로 도입 시 전용차로 이외 차로가 과포화되는 현상이 나타났으며, 3차로에 설치하는 것이 이동성 측면에서 더 효과적
 - 혼입률이 30~40%일 경우 자율주행 전용차로 설치가 타당하며, 합류 구간은 자율주행 전용차로가 없는 것이, 분류구간의 경우 최좌측차로에 설치하는 것이 효율성 및 안전성 측면에서 유리
 - 혼입률 30%까지 우측에, 30~70%까지는 전용차로가 없는 것이, 그 이상일 경우 좌측에 전용차로 2개 설치하는 것이 효율성 및 안전성 측면에 유리
 - LOS D 인 경우 자율주행 전용차로 1개 또는 2개 설치가 필요하며, LOS E 이상인 경우 전용차로 3개가 필요

2) 단속류의 자율주행차 전용도로에 대한 기존연구

- 단속류에 대한 연구는 초기 단계
- 2017년 국외에서 수행된 연구는 혼입률 40% 이하에서 전용차로 도입은 적합하지 않은 것으로 결론 내림
- 국내의 대전광역시 대상의 연구는 자율주행차 전용도로를 설치하지 않는 경우가 전체 차량 흐름에 가장 좋지만, 설치한다면 좌측 전용차로가 우측 전용차로보다 효과적
 - 해당 구간은 편도 3~5차로로 구성되어 있으며, 지하차도 편도 2차로가 중앙에 설치되어 있음(버스전용차로 존재하지 않음)
 - 혼입률이 증가하면 여유 차로수에 따라 전용차로 역시 수가 늘어남

3) 자율주행차 전용도로 사례 구축

- 미국, 중국, 일본 등에서는 자율주행차 전용도로 구축 사업을 시행하고 있으며, 고속도로 대상으로 주로 1차로에 설치
- 해당 도로 건설시 가로등 및 카메라, 센서 등을 부착한 시설물 설치하여 날씨, 시간 등에 구애받지 않고 도로표지판 및 차선 등을 정확하게 식별할 수 있도록 함
- 자율주행차 전용도로 구축은 안전 측면에서 인프라(조명, 차선, 도로표지, 카메라, 센서 등)를 함께 구축하여야 안전이 담보될 수 있음
- 본 시뮬레이션 분석 시 인프라 반영이 어렵기 때문에 인프라는 모두 구축되어 있다는 가정하에 연구를 수행

4) 연구 수행을 위한 시사점

- 단속류 관련 연구는 미진하므로 연구의 가치가 있음
 - 자율주행차가 연속류에 진입하기 위해서는 단속류 구간을 반드시 통행해야 하기 때문에 단속류 구간의 자율주행 전용차로 관련 연구 수행 필요
- 연속류 연구 결과를 살펴보면 기하구조 형태, 자율주행차 혼입률에 따라 분석 결과가 상이하기 때문에 가상의 도로뿐만 아니라 실제로 대상의 연구 필요
 - 포화교통량의 도출이나 신호 효과, 교통량의 증가 효과 등 목적에 따라서는 가상의 단순화된 네트워크가 효과적
 - 그러나 도심도로의 구조적 복잡성을 반영한 연구는 필수
- 평균통행속도 및 시간, 지체시간이 주요 지표로 활용됨
- 자율주행차와 일반차 간의 상대적 이익과 불이익을 비교하여 제시하지는 않음
- 전용차로가 설치된다고 해서 일반차 운전자에게 과도한 불편이 야기된다면 시민 저항으로 인해 오히려 불만 사항이 될 수 있음. 따라서 단순히 전체 평균보다는 일반차량과 자율주행차의 통행상태를 모두 살펴볼 필요가 있음
- 1차년도 연구와의 연속성을 고려하여 1차년도 연구의 문제점인 지하차도 구간에서의 합류시 상충 문제 등을 해결하기 위한 방안으로 지하차도의 지상화를 연구에 포함

제3장 시뮬레이션을 활용한 전용차로 효과 분석

1. 시뮬레이션 분석 개요

1.1. 분석의 목적

- 자율주행차의 활성화를 위해 고속도로에 전용차로를 설치하는 계획이 진행 중
- 국가 R&D에서는 전용차로를 도심 도로에도 적용이 가능한지 연구 중
- 이에 3기 신도시와 같은 신도시에서 전용차로를 설치할 필요성과 효과가 있는지 검토할 필요가 있으며, 다음의 목적을 달성하고자 함
 - 자율주행 전용차로 도입 시 효과와 운영 방안을 마련하기 위한 기초자료 도출
 - 전용차로의 설치 위치에 따른 차량흐름 상태의 변화 도출 및 검토
 - 모델링을 통한 차량 흐름의 통점 도출 및 개선 대안의 효과 검토

1.2. 분석 대상지 및 자료 수집

1) 분석 대상지

- 시뮬레이션 분석 대상지는 1차 연구와의 연속성을 고려하여 고양 창릉지구로 하였으며, 전용차로의 효과분석을 위해 버스전용차로가 설치된 구간으로 선정
- 1차 연구에서는 분석대상 지역을 크게 3개로 구분하여 자율주행 자동차 혼입률 변화를 0~100%까지 20% 단위로 증가시켜 분석
 - 1차 연구 결과 문제구간은 지하차도 유·출입부 등의 자율주행차와 일반차가 차선변경을 서로 혼재 및 상충하는 구간과 교차로가 조밀하게 설치되어 좌우 회전이 빈번한 곳으로 나타남
- 선정 대상지는 지하차도와 버스전용차로가 존재하고, 교차로간 설치 간격이 짧거나 차선 수의 변화가 잦은 구간
- 총연장 4.7km의 도로이며, 도로상에 12개 신호교차로를 포함
- 남북축 S43~S35은 가로변 버스전용차로가 설치될 계획이며, 동서축 S43~25에는 중앙 버스전용차로가 설치되어 운영 중



[그림 3-1] 분석 대상 신도시의 토지이용계획도

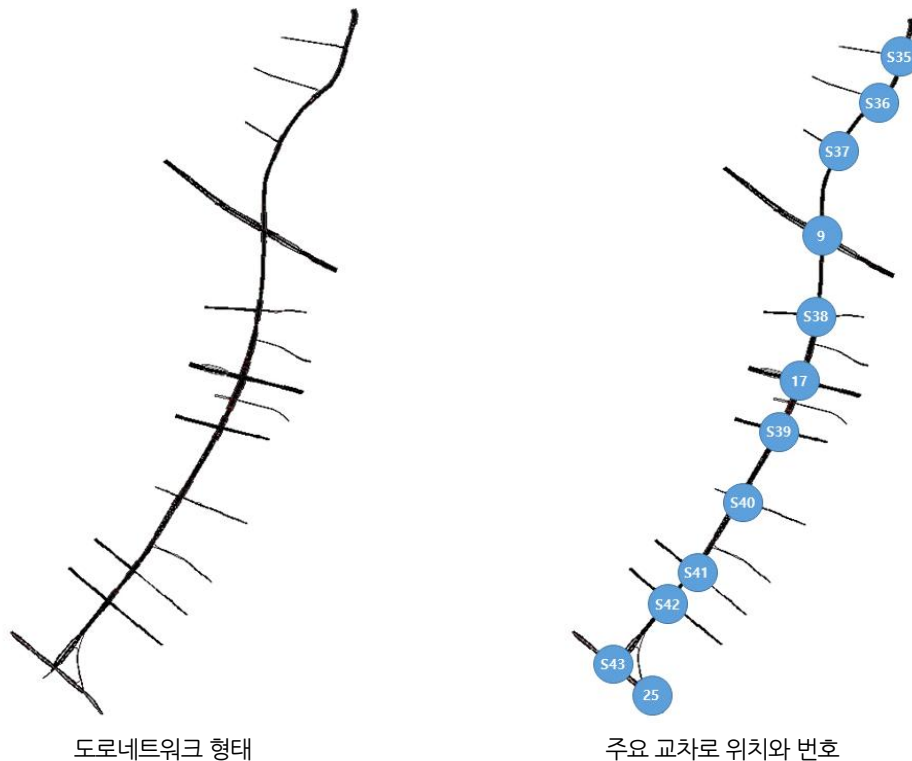
자료 : LH 공간정보 시스템



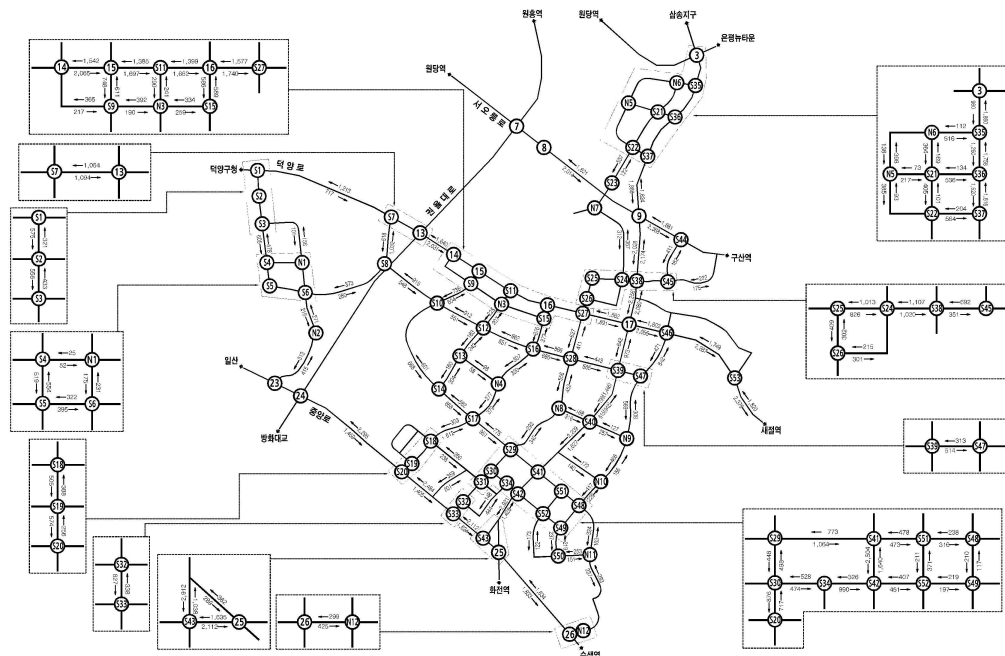
[그림 3-2] 분석 구간

2) 기초 자료

- 해당 구간은 아직 건설되지 않은 지역이기 때문에 2021년 고양창릉 지구의 교통영향평가에서 제시한 교차로 기하구조, 교통량, 신호주기 등의 자료를 활용
- 가로 및 교차로 회전 교통량
 - 교차로 기하구조는 고양창릉지구의 교통영향평가에서 제시한 도면을 이용([그림 3-2])
 - 내부 교차로 및 가로 교통량, 교차로 위치는 [그림 3-3]에서 분석 대상지에 해당하는 부분을 발췌하여 참고
 - ※ 해당 자료는 SUMO로 네트워크 구축 후 정산 시 교통량으로 활용함
 - [그림 3-3]의 사업지 내부 교차로 교통량은 모델링을 위한 O/D 구축 시 활용
- 버스통행량
 - 화랑로(남북축)의 신설 버스전용차로의 경우 고양창릉 광역교통개선대책(국토교통부, 2020)에서 제시한 첨두시간 기준 시간당 151대를 입력값을 설정
 - OD전체의 3%(교통영향평가 자료 기준)를 버스 통행으로 설정

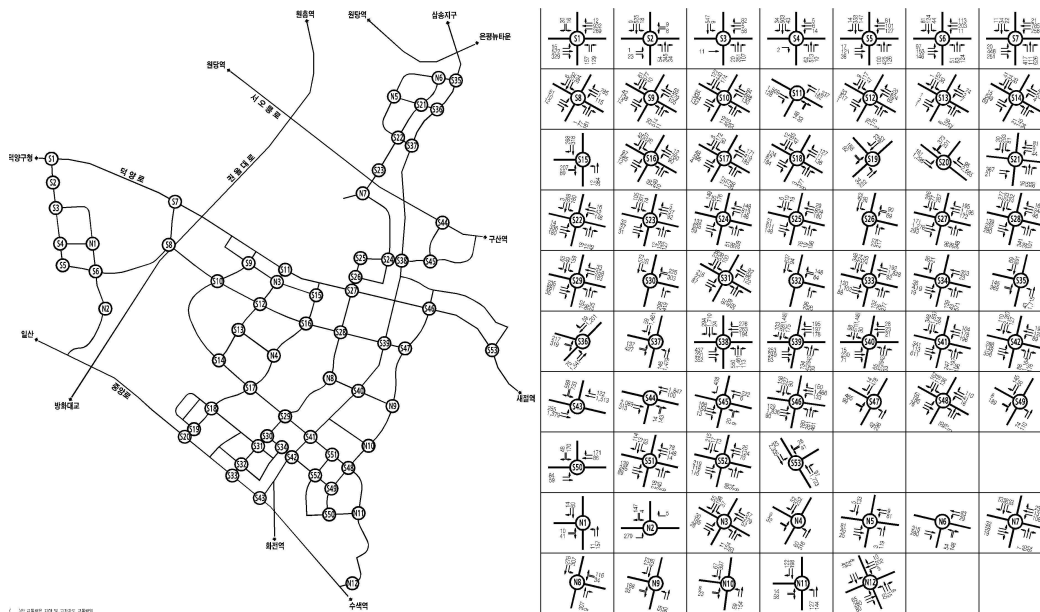


[그림 3-3] 분석 대상 도로 네트워크



[그림 3-4] 사업지 내부 가로구간 교통량도(대/시)

자료 : 한국토지주택공사(2021)



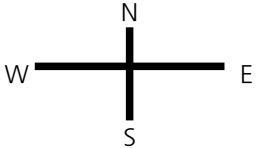



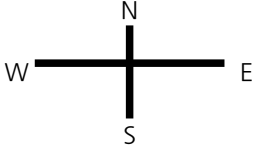



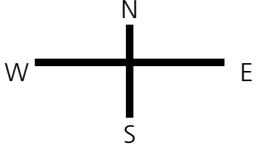



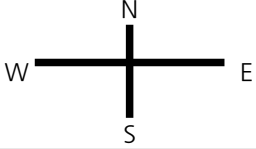




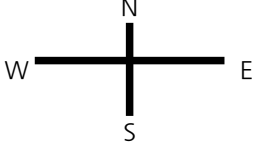




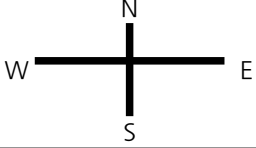




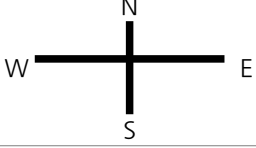




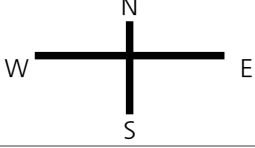




[그림 3-5] 사업지 내부 교차로 교통량도(대/시)

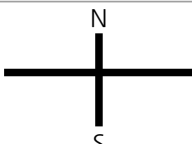




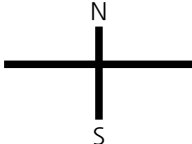




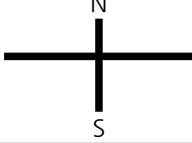



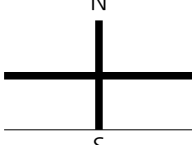



자료 : 한국토지주택공사(2021)

3) 신호 현시

- 대상지의 교차로 신호현시는 다음과 같이 제시되어 있으며, 주기는 ㉔ 화전역앞 교차로(144초)를 제외하고 180초로 구성

[표 3-1] 분석 구간 교차로 신호운영계획

교차로명	교차로형태	현시				주기(초)
		Φ1	Φ2	Φ3	Φ4	
㉔ 신설교차로					-	180
		97(3)	37(3)	37(3)	-	
㉕ 신설교차로					-	180
		97(3)	37(3)	37(3)	-	
㉖ 신설교차로					-	180
		97(3)	37(3)	37(3)	-	
⑨ 용두사거리						180
		36(3)	35(3)	54(3)	44(3)	
㉗ 신설교차로						180
		46(3)	40(3)	41(3)	41(3)	
⑪ 화랑교차로						180
		47(3)	47(3)	35(3)	39(3)	
㉘ 신설교차로						180
		54(3)	24(3)	45(3)	45(3)	
㉙ 신설교차로						180
		99(3)	12(3)	45(3)	12(3)	

교차로명	교차로형태	현시				주기(초)
		Φ1	Φ2	Φ3	Φ4	
㉔1 신설교차로	W  E					180
	S	71(3)	23(3)	41(3)	33(3)	
㉔2 신설교차로	W  E					180
	S	69(3)	13(3)	43(3)	43(3)	
㉔3 신설교차로	W  E				-	180
	S	85(3)	32(3)	54(3)	-	
㉔5 화전역앞교차로	W  E				-	144
	S	90(3)	12(3)	33(3)		

자료 : 한국토지주택공사(2021)

2. 시뮬레이션 환경 구축

1) 시뮬레이션 Tool 선정

- 자율주행차 도입에 따른 교통흐름 영향 여부 분석을 위해서는 자율주행차의 운행 특성을 반영할 수 있어야 하므로 중시적 및 미시적 시뮬레이션을 주로 활용
 - 기존 연구에서도 국내의 경우 대부분 대표적인 미시적 시뮬레이션 패키지인 VISSIM을 활용
- 본 연구는 를 위해 1차 연구에서 사용한 SUMO(Simulation of Urban MObility)를 계속 활용
 - SUMO는 2001년 독일의 항공 우주센터에서 개발된 오픈소스 도로 교통 시뮬레이터로서, 주정차 차량, 신호등 체계, 철도, 대기오염물질 배출 등을 포함한 실제 세계와 가까운 종합적인 도로 교통 모델링을 지원하며, 특히 TraCI (Traffic Control Interface) 인터페이스를 통해 외부 어플리케이션과 SUMO 시뮬레이터를 연결하여 시뮬레이션을 컨트롤 할 수 있음(김영재·홍장의, 2021)
 - 오픈소스로 누구나 활용할 수 있으며, 데이터 입력이 쉽고 자율주행차 구현 가능

[표 3-2] 자율주행차량 주행특성 분석을 위한 미시 교통시뮬레이션 비교

구분	License	Extensibility	Agent Oriented	Parallelism/Distribution	IVC6	Interactivity	Maturity Level
VISSIM	Commercial	Yes	No	Yes ³	No	High	High
PARAMICS	Commercial	Yes	No	Yes ^{3,4}	No	High	High
AIMSUN	Commercial	Yes	No	Yes ³	No	High	High
MITSIM	Both	Yes ²	No ²	Yes ³	No	Low	Low
SUMO	GPL	Yes ²	No ²	Yes ³	No ⁵	Medium	High
MAS-T2erLab	Free	Yes ¹	Yes ¹	Yes ³	No	Medium	Low

출처 : Pereira(2011)

각주 : 1 Only for external traffic light control.

2 Being an open-source software, it can be extended through source code modification.

3 Supports Parallel simulation processing.

4 Supports Distributed simulation processing.

5 Successful implementation reported in Christoph Sommer, Isabel Dietrich, and Falko Dressler. Realistic Simulation of Network Protocols in VANET Scenarios. 2007 Mobile Networking for Vehicular Environments, pages 139–143, 2007.

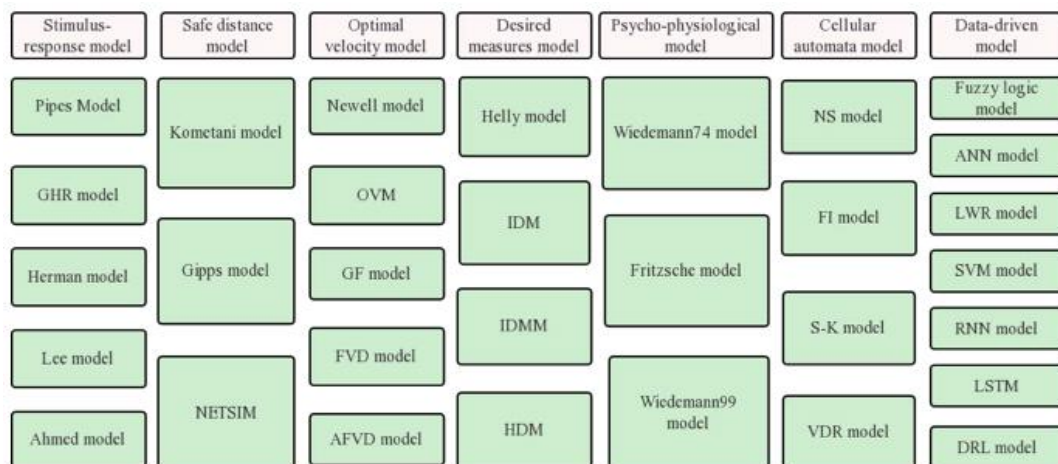
6. Inter-vehicular Communications

2) 차량운행 모델링을 위한 모형과 파라미터 설정

- 일반차와 자율주행차의 운행 특성을 반영하기 위해 적합한 모형과 파라미터를 선행 연구를 참고하여 설정
- 마이크로 모델에서는 차량의 운행행태를 정밀하게 모사함으로써 차량간 상호 작용을 반영하여 차량의 흐름을 분석함
- 차량의 운행행태를 모사하는 모델에는 차량 추종모델(car-following models)과 차선 변경모델(lane change models)이 대표적이며, 이 중 특히 차량 추종모델이 우선적으로 고려되고 있음

■ 일반차량의 차량 추종모형

- 차량 추종모델에는 기존의 일반차량(Human-driven vehicles)의 경우 크게 7가지의 모형과 각 세부 모형에 따라 약 31가지 이상의 모형이 존재함([그림 3-4])



[그림 3-6] 차량추종모형의 종류

자료 : Wang et al.(2023)

- 이중에서도 일반적으로 상업용 모델링 소프트웨어인 VISSIM, AIMSUN, MITSIM, Paramics에서 사용 모형이 주로 활용됨(Olstam and Tapani, 2004)
 - AINSUM의 Safety distance model인 Gipps 모형
 - MITSIM의 Stimulus-response model인 GHR 모형
 - Paramics 의 Psycho-physiological model인 Fritzsche 모형
 - VISSIM의 sycho-physiological model인 Widemann 모형

- 최근에는 ITS체계를 반영하여 Desired measures model인 IDM 계열의 모형 역시 널리 활용되고 있음
- 그리고 외국 학계를 중심으로 오픈소스 모델링 소프트웨어인 SUMO에서 주로 활용되는 Krauss 모형 역시 점차 확산 중
- 국내의 경우 소프트웨어 패키지 이용의 편의성으로 인해 VISSIM에서 주로 사용하는 Widemann 모형과 AIMSUN의 Gipps 모형이 폭넓게 사용되고 있음

■ 자율주행차의 추종모형

- 자율주행차의 차량 추종모형은 일반차와 다를 것이라고 일반적으로 받아들여짐
- 그러나 자율주행차를 고려하는 연구에서도 기본적으로 기존의 차량 추종모형을 기반으로 약간의 변형(코딩)을 하여 사용하는 것이 일반적
- 순수 모형이 아닌 패키지를 이용할 시에는 각 패키지가 제공하는 모형을 기반으로함
- 일반적으로는 Safety distance model인 Gipps 모형, Desired measures model인 IDM 계열과 ACC 및 CACC 모형, Psycho-physiological model인 Widemann 모형이 널리 활용됨(Wanng et al., 2023)

※ Cellular Autometa 모형과 Data Driven 모형 역시 컴퓨터 성능의 향상을 통한 대용량 자료와 빠른 알고리즘 처리로 대학 연구소를 중심으로 활용

- 특히, 최근에는 자율주행과 인프라의 연계 등의 효과를 반영한 IDM과 ACC, CACC 모형이 자율주행차 모델에서는 확산 중
- IDM(Intelligent Driver Model)은 기본적으로 숙련된 운전자의 행동 모사하는 모형이며, 최소 안전거리를 유지하면서 최고 속도로 주행하는 알고리즘(박인선 외, 2015)
- ACC(Adaptive Cruise Control)와 CACC(Cooperative Adaptive Cruise Control)는 첨단운전자지원시스템인 ACC를 반영한 모형이며, CACC는 ACC에 V2V 통신을 활용한 차량 간 협력주행(Cooperative)을 반영한 모형(박지원 외, 2018)

※ 자율주행차의 Lv2가 ACC 수준의 기능을 제공하고, Lv3 이상에서는 CACC의 기능을 제공할 것으로 예상됨

■ 연구에서의 자율주행차의 추종모형 선택과 파라미터 설정

- SUMO에서 사용하는 차량추종모형은 Krauss, IDM, IDMM, EIDM, Wiedemann, ACC, CACC 등을 제공
- SUMO 모형을 사용하는 연구에서는 문헌고찰 결과 일반차량은 Krauss 모델을 가장 많이 사용하고, 자율주행차의 경우 IDM을 주로 사용
 - Krauss 모형의 경우 안전속도를 기반으로 차량의 가감속을 결정하는 모형이며, SUMO를 활용한 연구에서는 일반적으로 활용
 - 자율주행차의 추종모형의 경우 ACC또는 CACC가 이상적일 수 있으나, 이는 고속 도로와 같은 연속류의 경우에 해당하며, 연구대상지의 교차로간 간격이 평균 470m 정도로 ACC와 CACC가 실제 작동하기 어려운 환경임
 - 따라서 사고회피(Accident free)와 대부분의 교통환경에 대한 대응이 우수한 IDM을 채택함
 - 부가적으로 기존연구결과 일반차와 자율주행차의 혼입 운행 상태(Mixed)인 경우 IDM이 조금 더 나은 결과를 보여줌(Sadid and Antoniou, 2023; Wang et al., 2023)
- 본 연구에서는 일반차 및 버스는 기본 추종모형인 Krauss 모델, 자율주행차의 경우 널리 사용되는 지능형 운전 추종모형인 IDM을 적용
- 모형의 구현을 위해 차량 제원, 차두거리, 속도, 가감속 등의 파라미터를 설정
- 차량의 제원은 1차 연구에서 선정한 차종 및 제원을 사용하였으며, 자율주행차 역시 일반차량과 동일한 제원을 사용
 - 차종의 경우 2021년 기준 승용차 및 트럭은 신차 판매대수가 가장 많은 모델, 버스는 점유율이 가장 높은 모델로 선정
 - 차종 비율은 2021년 고양창릉 공공주택지구 교통영향평가에서 조사한 침투 6시간 기준으로 전체 교차로 차종별 교통량을 합하여 평균한 값을 사용

[표 3-3] 분석 차량 제원

차종	모델명	제원(전장)
승용차 / 자율주행승용차	그랜저	5,035mm
버스 / 자율주행버스	현대 블루시티	10,000mm

- 자율주행차의 특성¹⁴⁾은 방어운전 행동패턴보다 성능중심(공격운전)의 행동패턴으로 설정하였으며, 선행연구에서 제시한 파라미터 값을 참고하여 설정(Karbasi et al., 2022)
 - 자율주행차의 차량 흐름을 원활하게 하기 위해 차두거리를 0.5m로 좁게 설정하여 도로의 단위 거리 당 더 많은 차량이 존재할 수 있어 이론상 차량의 흐름을 더 빠르게 할 수 있고, 효율을 향상 시킬 수 있음
- 일반 버스와 자율주행버스의 가속 파라미터는 일반 자율주행 승용차보다 가속 능력이 떨어지기 때문에 약 50%를 감소시켜 적용

[표 3-4] 본 연구에서 적용한 자율주행차와 일반 차량의 제어변수(파라미터) 값

제어변수	설명	일반차량		자율주행차	
		승용	버스	승용	버스
Car-following model	The model used for car-following	Krauss		IDM	
minGap	Empty space after leader [m]	1.5	1.5	0.5	0.5
accel	The acceleration ability of vehicles of this type [m/s^2]	2.6	1.2	3.8	2.0
decel	The deceleration ability of vehicles of this type [m/s^2]	4.5	4.0	4.5	4.0
emergencyDecel	The maximal physically possible deceleration for the vehicle [m/s^2]	8.0	7.0	8.0	7.0

- 차량 간 통신과 군집주행(platoon)은 따로 고려하지 않고, SUMO의 기본값을 활용하여 자율주행차를 구현

14) 1차 연구에서는 자율주행차의 주행특성을 보수적으로 접근하여, 자율주행차가 사람보다 방어적으로 운전하는 것으로 가정함. 반면 본 연구는 전용차로의 효과 분석이 주 목적이므로 자율주행차의 성능에 초점에 맞춤

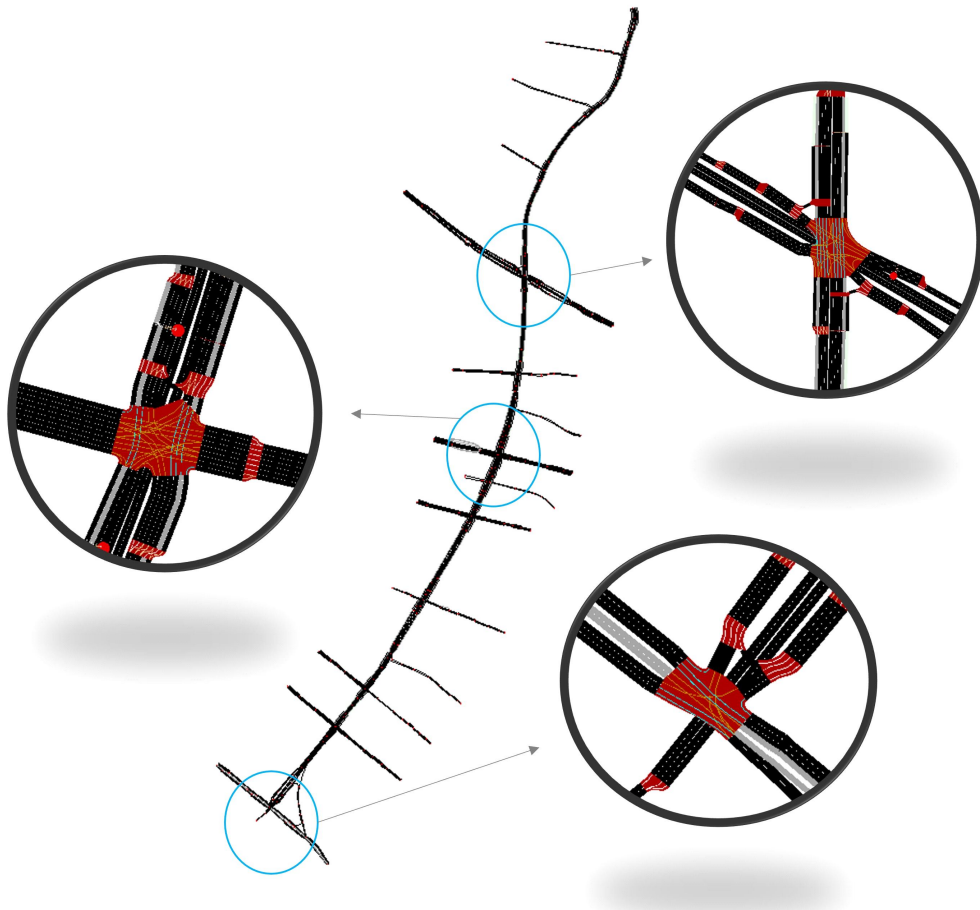
3) 네트워크 구축

- SUMO로 분석 구간의 기본 네트워크와 시나리오별 네트워크를 구축함

※ 시나리오 구성은 뒤에서 상세히 설명함

■ 기본 네트워크

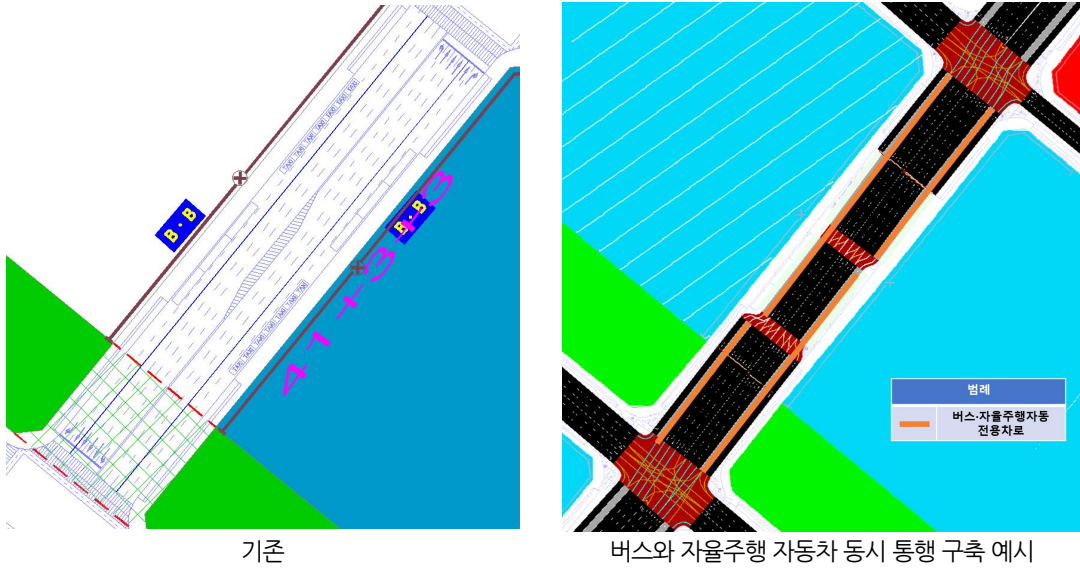
- 교통영향평가에서 제시된 네트워크를 그대로 적용
 - 지하차도 2개소, 가로변 버스전용차로(남북축), 중앙버스전용차로(동서축)
- 시나리오 A를 테스트하기 위한 목적으로 활용



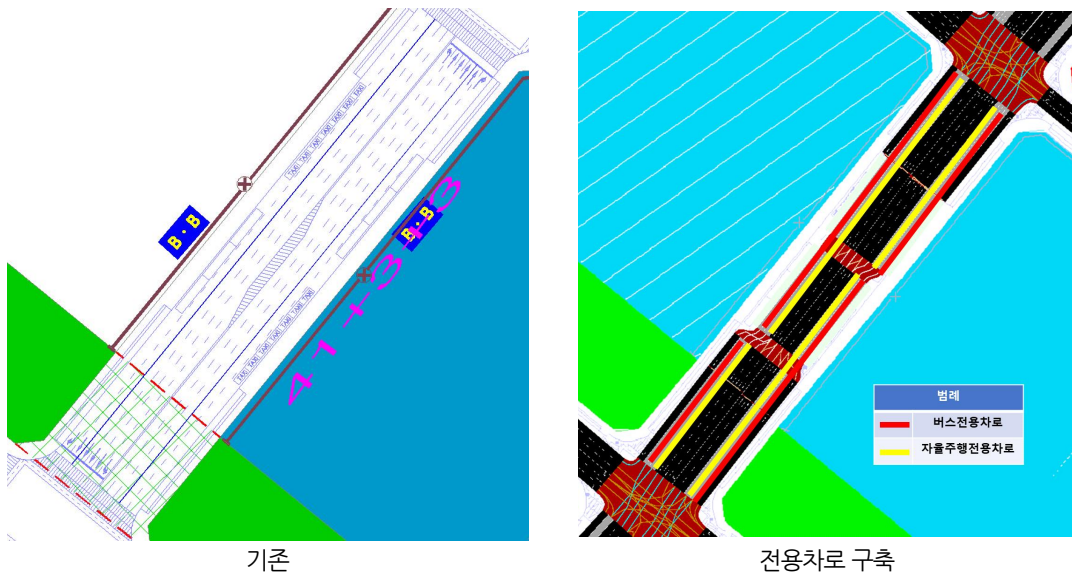
[그림 3-7] 시뮬레이션 네트워크

■ 전용차로 설치 네트워크

- 현재 전용차로가 없는 네트워크에 시나리오에 맞춰 전용차로를 구축
- 시나리오 B~D의 테스트에 활용



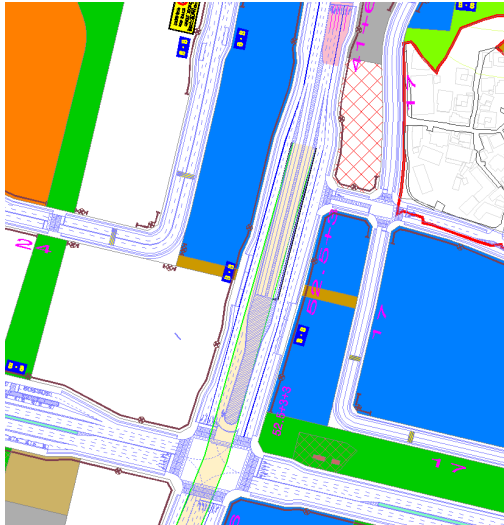
[그림 3-8] 버스와 자율주행차 공유 차로 구축



[그림 3-9] 전용차로 구축

■ 지하차도의 지상화 효과 검증 네트워크

- 남북축으로 지하도로를 지상화하고 전용차로를 구축
- 시나리오 E와 G 등 개선 대안 검토를 위한 시나리오에 적용

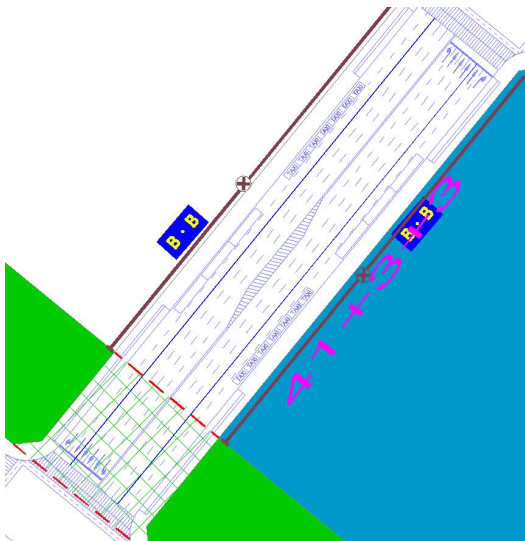


현재 네트워크



지하차도 지상화 구축 예시

[그림 3-10] 지하차도 지상화 및 전용차로 구축



기존

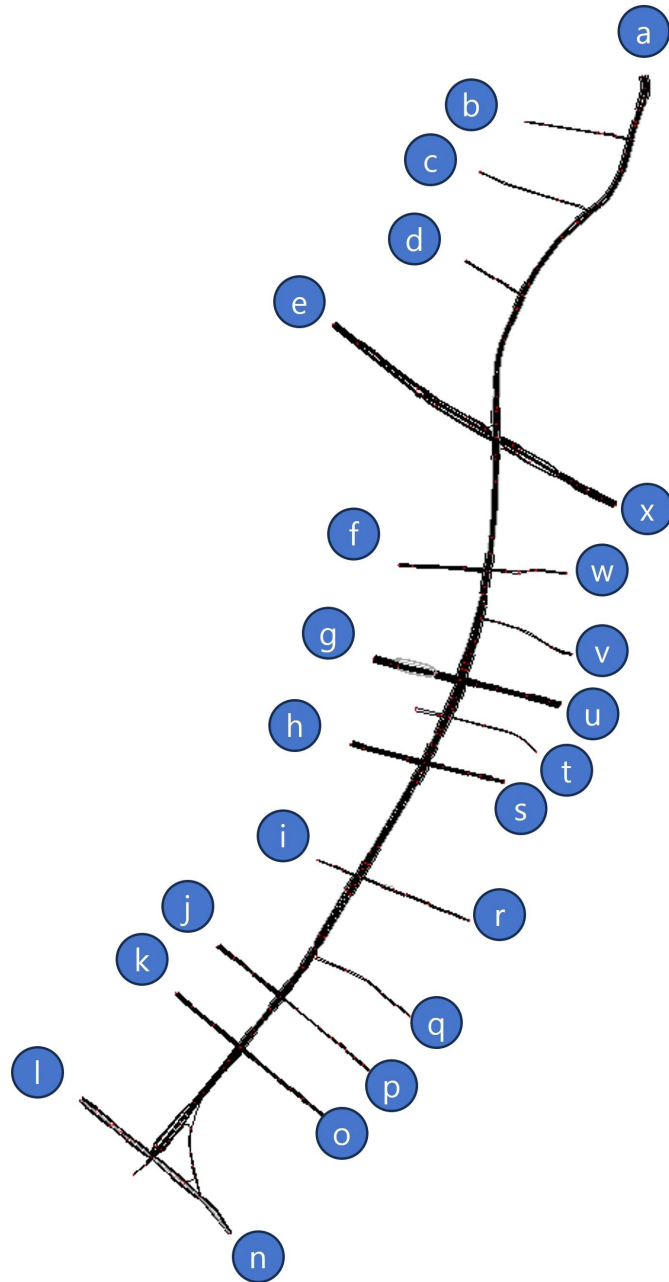


중앙전용차로 구축

[그림 3-11] 중앙전용차로 구축

4) O/D 구축

- 고양창릉지구 교통영향평가에서 제시한 교통량을 기초로 대상지의 유입지점 23개소에 대해 O/D를 구축



[그림 3-12] O/D 구축을 위한 유·출입 지점

[표 3-5] 구간별 O/D 통행량

OD\	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	n	o	p	q	r	s	t	u	v	w	x	계
a		104	149	89	165	145	56	24	0	50	29	21	45	19	14	25	1	18	6	84	7	89	87	1,227
b	49		5	3	5	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1	3	3	77
c	30	13		5	9	8	1	2	0	0	0	0	0	0	0	2	1	2	1	4	1	5	5	89
d	24	10	10		19	17	7	3	0	0	0	0	0	0	0	3	1	3	2	10	2	10	10	131
e	66	28	25	35		66	26	1	1	12	12	10	12	10	7	2	2	2	4	40	5	41	1,372	1,779
f	63	26	24	33	30		49	21	2	43	26	19	39	18	14	22	3	16	7	72	9	266	38	840
g	10	11	10	14	12	18		69	3	21	13	9	19	8	7	11	10	52	23	1,024	0	10	15	1,369
h	3	3	3	3	3	4	18		3	17	10	8	15	7	5	9	8	198	0	36	0	3	3	359
i	2	2	2	3	2	3	12	6		7	5	3	7	3	3	5	44	14	0	24	0	2	3	152
j	49	15	14	19	18	26	13	7	9		31	23	45	21	180	0	5	20	0	24	0	14	22	555
k	11	4	4	5	5	6	3	2	3	20		12	24	128	7	0	2	5	0	6	0	4	5	256
l	97	29	26	38	33	51	24	12	16	175	176		1,514	29	56	0	8	38	0	45	0	28	42	2,437
n	118	35	33	46	41	62	28	14	19	214	215	1,391		35	68	0	10	37	0	54	0	33	52	2,505
o	12	5	4	5	5	7	4	3	3	23	148	23	46		8	0	2	5	0	7	0	4	6	320
p	24	7	7	10	9	13	7	3	5	114	26	19	38	17		0	3	10	0	12	0	7	11	342
q	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30	15	10	25	9	7		0	0	0	0	0	0	0	96
r	1	1	1	1	1	1	4	3	235	0	0	0	0	0	0	3		5	0	24	0	1	1	282
s	4	4	4	5	5	7	30	255	1	5	3	3	5	3	2	3	3		0	61	0	4	5	412
t	0	0	0	0	0	0	0	12	0	1	1	1	1	1	1	11	0	7		0	0	0	0	36
u	27	27	25	35	31	47	1,441	36	2	11	7	5	10	5	4	6	5	27	12		0	26	39	1,828
v	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12		0	0	20	
w	5	3	3	3	3	237	7	5	1	6	5	4	6	3	3	5	1	0	2	7	3		4	316
x	87	36	33	46	1,519	77	31	14	0	26	16	12	25	12	9	14	3	10	5	46	6	48		2,075
계	682	363	382	398	1,915	800	1,769	492	303	775	738	1,573	1,876	328	395	122	113	469	63	1,592	34	598	1,723	17,538

5) 모델 정산

■ 정산 방법

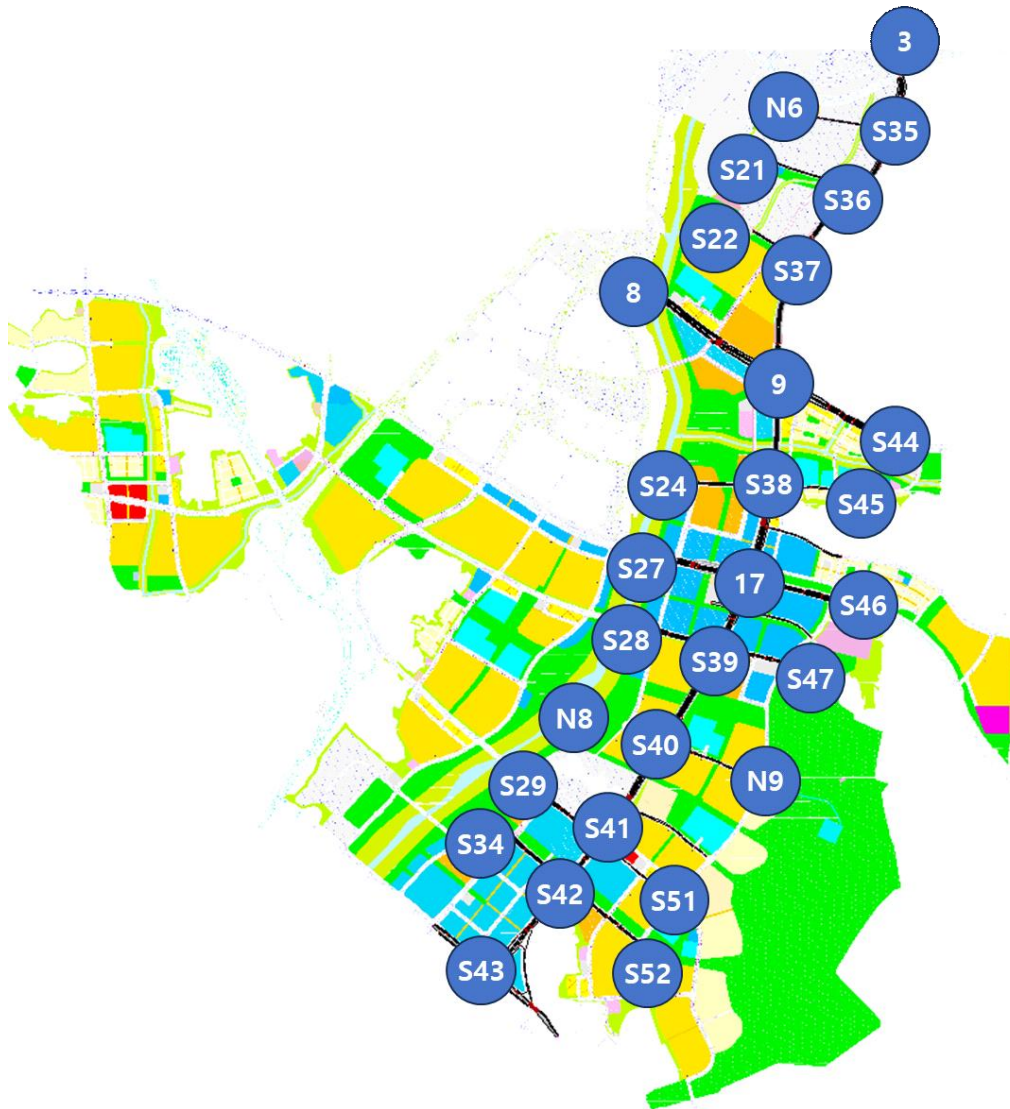
- 미시적 프로그램의 경우 현실의 데이터(교통량, 도로환경 등)를 기반으로 가상 현실에서 대상지를 구현하므로 가상에서 구현한 환경이 현실을 잘 반영하였는지를 확인하는 절차(정산, Calibration)를 수행
- 일반적으로 미시적 시뮬레이션 모형의 정산은 4가지로 요약되며, 본 연구에서는 Error Checking과 포괄적인 검토 방법을 사용

[표 3-6] 미시적 시뮬레이션 모형의 정산 단계

구분	내용	선정
Error Checking	<ul style="list-style-type: none"> 정산을 시작하기 전에 모형 입력 자료들이 정확하게 준비되었는지 확인하는 것이 중요함 구축된 교통망, 교통수요, 그리고 default parameter의 다양한 검토와 연관 차량 관련 계수(차종구성, 차량 성능 특성, 차량 제원 등), 링크 속성, 교차로 속성, 수요 입력, Error를 확인하기 위해 매우 낮은 교통량에서 시뮬레이션 수행, 주행하는 특정 차량 추적 등을 검토 	○
용량 정산	<ul style="list-style-type: none"> 미시적 시뮬레이션에서는 용량이라는 구체적인 값을 직접적으로 산출하지 않기 때문에 용량 정산 계수(평균차두시간, 평균반응시간 등) 들을 활용 모형에 의해 추정된 최대 가능 교통류율과 용량의 현장 값 사이의 평균 제곱 에러(MSE)를 최소화해야 하며, percent mean square error를 사용 	×
수요 정산	<ul style="list-style-type: none"> 수요와 관련된 모형 계수 정산 관측된 수요 수준과 경로 선택 일치시는 작업으로 관측된 교통량과 추정된 교통량 사이의 MSE를 최소화하는 것이 중요 	×
포괄적인 검토	<ul style="list-style-type: none"> 모형에 의해 예측된 전반적인 교통 성능을 대기시간, 대기길이, 통행시간과 같은 현장 측정값들과 비교 GEH 통계치는 미시적 교통 시뮬레이션 모형 값과 현장 값을 비교할 때 사용되는 계산 방법 GEH 값을 이용하면, 두 개의 서로 다른 교통량 집합을 비교할 때 간단히 백분율을 사용할 때 경험할 수 있는 단점을 보완 GEH 값이 5 이하인 지점이 전체 지점의 85% 이상인 경우, 그 예측 값은 관측 값과 일치하여 사용하기에 타당하다고 판단 $GEH = \sqrt{\frac{(V-C)^2}{(V+C)/2}}$ <p>여기서, GEH : 통계치 V : 모형에 의해 산출된 특정 지점에서의 일 방향 시간당 교통량 C : 모형과 동일한 지점에서의 실제 관측 교통량</p>	○

■ 정산 지점 선정

- Error Checking은 네트워크를 구축하며 입력한 파라미터들이 정확한지 확인하는 것으로 시뮬레이션 분석을 수행하며 추출된 데이터들을 확인
- 포괄적인 검토 방법의 경우 정산 지점을 선정하여, 교통영향평가에서 제시한 교통량과 시뮬레이션 상의 교통량과의 차이를 비교하는 것으로 교통량을 비교
- 정산을 수행하기 위해 데이터 추출 지점을 선정



[그림 3-13] 정산을 위한 교통량 측정 구간

■ 정산 결과

- GEH가 5 이하인 지점이 전체 지점의 98%로 적정하다고 판단하여 해당 O/D 및 네트워크를 활용

[표 3-7] 정산 결과

구간	교통영향평가 교통량 (대/시)	시뮬레이션 교통량(대/시)	GEH	비고
3_s35	975	964	0	북 → 남
s35_s36	1,274	1,255	1	
s36_s37	1,534	1,511	1	
s37_9	1,904	1,869	1	
9_s38	2,049	1,981	2	
s38_17	2,282	2,522	5	
17_s39	845	955	4	
s39_s40	803	826	1	
s39_s40(지하차도)	1,451	1,483	1	
s40_s41	2,219	2,291	2	
s42_s43	2,921	2,918	0	
s43_s42	1,458	735	22	남 → 북
s41_s40	1,640	1,371.5	7	
s40_s39	624	496	5	
s40_s39(지하차도)	942	845	3	
s39_17	988	852	4	
17_s38	2,092	2,194	2	
s38_9	2,191	2,022	4	
9_s37	1,626	1,523	3	
s37_s36	1,616	1,516	3	
s36_s35	1,757	1,652	3	
s35_3	1,861	1,748	3	남북 축 동쪽
s52_s42	409	400	0	
s42_s52	456	382	4	
s51_s41	482	475	0	
s41_s51	484	425	3	
n9_s40	130	131	0	
s40_n9	261	320	3	
s47_s39	314	547	11	
s39_s47	520	467	2	
s46_17	1,826	1,791	1	
17_46s	2,081	1,983	2	
s45_s38	697	731	1	

s38_s45	357	373	1	
s44_9	1,880	1,983	2	
9_s44	2,391	2,314	2	남북 축 서쪽
s34_s42	990	955	1	
s42_s34	334	299	2	
s29_s41	1,070	1,042	1	
s41_s29	777	706	3	
n8_s40	322	325	0	
s40_n8	171	194	2	
s28_s39	581	555	1	
s39_s28	446	418	1	
s27_17	1,900	1,904	0	
17_s27	1,591	1,504	2	
s24_s38	1,048	1,033	0	
s38_s24	1,123	1,079	1	
8_9	2,030	2,063	1	
9_8	1,835	2,018	4	
s22_37	567	559	0	
37_s22	207	208	0	
s21_s36	537	534	0	
s36_s21	136	143	1	
n6_s35	517	510	0	

6) 검지기 설치

- SUMO는 총 3가지의 검지기를 제공하며 목적에 따라 활용성이 높음

[표 3-8] SUMO 검지기 종류 및 특징

구분	Induction Loops Detector	(Multi)lane Area Detector	Entry-Exit Detector
특징	<ul style="list-style-type: none"> 도로구간이 아닌 특정 지점을 통과하는 차량 측정 	<ul style="list-style-type: none"> 도로구간이 아닌 지정 차선을 통과하는 차량 측정 	<ul style="list-style-type: none"> 도로 전체 및 구간에 다중으로 진입/진출 지점을 지정할 수 있으며, 진입검지기에서 진출검지기를 통과하는 차량 측정
측정값	<ul style="list-style-type: none"> 교통량, 점유율, 속도, 차량평균길이 	<ul style="list-style-type: none"> 교통량, 점유율, 속도, 손실시간, 대기행렬길이, 정지시간 	<ul style="list-style-type: none"> 교통량, 속도, 통행시간, 손실시간
설치예시			

자료 : SUMO 온라인 매뉴얼, 2023.10.27. 읽음, <https://sumo.dlr.de/docs/Tools/Detector.html> 참조 저자 작성

- 본 연구는 자율주행차 혼입 비율에 따른 분석대상 구간의 도로 네트워크의 변화 분석이므로, 전체 및 구간에 대한 효과척도를 산출하는데 적합한 Entry-Exit Detector를 사용
- 시나리오별 시뮬레이션 수행 후 문제 구간을 선정하고 검지기를 설치
 - 축별(동서, 남북) 분석과 정체가 시작되는 지점
 - 축별 주요 구간(지하차도 지상화 구간, 버스전용차로 추가 설치 등) 등



[그림 3-14] 남북측 검지기 설치 구간



[그림 3-15] 동서측 검지기 설치 구간

7) 시뮬레이션 구동

- 시뮬레이션은 총 2시간 동안 실행하였으며, 전 후 30분을 제외한 1시간동안 도출된 결과를 활용

8) 효과척도

- 설치한 검지기에서는 교통량(대/시), 구간 평균속도(km/h), 차량당 평균 통행시간(초), 차량당 평균지체시간(초)을 수집 가능
- 구간 평균속도(이하 평균속도), 차량당 평균통행시간(이하 평균통행시간), 차량당 평균지체시간(이하 지체)를 효과를 검증하기 위한 지표로 활용

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" ?>
<e3Detector xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance" xsi:noNamespaceSchemaLocation="http://sumo.dlr.de/xsd/det_e3_file.xsd">
  <interval begin="0.00" end="300.00" id="E_W_9_AB" meanTravelTime="190.14" meanOverlapTravelTime="190.88" meanSpeed="5.75" meanHaltsPerVehicle="1.00"
    meanTimeLoss="108.64" vehicleSum="1" meanSpeedWithin="-1.00" meanHaltsPerVehicleWithin="-1.00" meanDurationWithin="-1.00" vehicleSumWithin="0"
    meanIntervalSpeedWithin="-1.00" meanIntervalHaltsPerVehicleWithin="-1.00" meanIntervalDurationWithin="-1.00" meanTimeLossWithin="-1.00"/>
  <interval begin="300.00" end="600.00" id="E_W_9_AB" meanTravelTime="-1.00" meanOverlapTravelTime="-1.00" meanSpeed="-1.00" meanHaltsPerVehicle="-1.00"
    meanTimeLoss="-1.00" vehicleSum="0" meanSpeedWithin="-1.00" meanHaltsPerVehicleWithin="-1.00" meanDurationWithin="-1.00" vehicleSumWithin="0"
    meanIntervalSpeedWithin="-1.00" meanIntervalHaltsPerVehicleWithin="-1.00" meanIntervalDurationWithin="-1.00" meanTimeLossWithin="-1.00"/>
  <interval begin="600.00" end="900.00" id="E_W_9_AB" meanTravelTime="-1.00" meanOverlapTravelTime="-1.00" meanSpeed="-1.00" meanHaltsPerVehicle="-1.00"
    meanTimeLoss="-1.00" vehicleSum="0" meanSpeedWithin="-1.00" meanHaltsPerVehicleWithin="-1.00" meanDurationWithin="-1.00" vehicleSumWithin="0"
    meanIntervalSpeedWithin="-1.00" meanIntervalHaltsPerVehicleWithin="-1.00" meanIntervalDurationWithin="-1.00" meanTimeLossWithin="-1.00"/>
  <interval begin="900.00" end="1200.00" id="E_W_9_AB" meanTravelTime="88.18" meanOverlapTravelTime="88.98" meanSpeed="12.43" meanHaltsPerVehicle="0.00"
    meanTimeLoss="2.76" vehicleSum="1" meanSpeedWithin="-1.00" meanHaltsPerVehicleWithin="-1.00" meanDurationWithin="-1.00" vehicleSumWithin="0"
    meanIntervalSpeedWithin="-1.00" meanIntervalHaltsPerVehicleWithin="-1.00" meanIntervalDurationWithin="-1.00" meanTimeLossWithin="-1.00"/>
  <interval begin="1200.00" end="1500.00" id="E_W_9_AB" meanTravelTime="-1.00" meanOverlapTravelTime="-1.00" meanSpeed="-1.00" meanHaltsPerVehicle="-1.00"
    meanTimeLoss="-1.00" vehicleSum="0" meanSpeedWithin="-1.00" meanHaltsPerVehicleWithin="-1.00" meanDurationWithin="-1.00" vehicleSumWithin="0"
    meanIntervalSpeedWithin="-1.00" meanIntervalHaltsPerVehicleWithin="-1.00" meanIntervalDurationWithin="-1.00" meanTimeLossWithin="-1.00"/>
  <interval begin="1500.00" end="1800.00" id="E_W_9_AB" meanTravelTime="-1.00" meanOverlapTravelTime="-1.00" meanSpeed="-1.00" meanHaltsPerVehicle="-1.00"
    meanTimeLoss="-1.00" vehicleSum="0" meanSpeedWithin="-1.00" meanHaltsPerVehicleWithin="-1.00" meanDurationWithin="-1.00" vehicleSumWithin="0"
    meanIntervalSpeedWithin="-1.00" meanIntervalHaltsPerVehicleWithin="-1.00" meanIntervalDurationWithin="-1.00" meanTimeLossWithin="-1.00"/>
  <interval begin="1800.00" end="2100.00" id="E_W_9_AB" meanTravelTime="88.66" meanOverlapTravelTime="89.44" meanSpeed="12.36" meanHaltsPerVehicle="0.00"
    meanTimeLoss="2.47" vehicleSum="1" meanSpeedWithin="-1.00" meanHaltsPerVehicleWithin="-1.00" meanDurationWithin="-1.00" vehicleSumWithin="0"
    meanIntervalSpeedWithin="-1.00" meanIntervalHaltsPerVehicleWithin="-1.00" meanIntervalDurationWithin="-1.00" meanTimeLossWithin="-1.00"/>
  <interval begin="2100.00" end="2400.00" id="E_W_9_AB" meanTravelTime="-1.00" meanOverlapTravelTime="-1.00" meanSpeed="-1.00" meanHaltsPerVehicle="-1.00"
    meanTimeLoss="-1.00" vehicleSum="0" meanSpeedWithin="-1.00" meanHaltsPerVehicleWithin="-1.00" meanDurationWithin="-1.00" vehicleSumWithin="0"
    meanIntervalSpeedWithin="-1.00" meanIntervalHaltsPerVehicleWithin="-1.00" meanIntervalDurationWithin="-1.00" meanTimeLossWithin="-1.00"/>
  <interval begin="2400.00" end="2700.00" id="E_W_9_AB" meanTravelTime="-1.00" meanOverlapTravelTime="-1.00" meanSpeed="-1.00" meanHaltsPerVehicle="-1.00"
    meanTimeLoss="-1.00" vehicleSum="0" meanSpeedWithin="-1.00" meanHaltsPerVehicleWithin="-1.00" meanDurationWithin="-1.00" vehicleSumWithin="0"
    meanIntervalSpeedWithin="-1.00" meanIntervalHaltsPerVehicleWithin="-1.00" meanIntervalDurationWithin="-1.00" meanTimeLossWithin="-1.00"/>
</e3Detector>
```

[그림 3-16] 시뮬레이션 Output 예시

3. 전용차로 도입 효과를 위한 시나리오 설정

3.1. 전용차로 효과분석 시나리오

- 기준이 되는 베이스 시나리오를 A0로 정함
 - **A0(Base) 시나리오 :**
 - 현재의 교통영향평가 상의 계획 네트워크 기준(이하 계획 네트워크)
 - 자율주행차가 운행하지 않는 현재 상태
- 자율주행 전용차로 도입 효과 분석을 위해 버스와의 공유 여부와 전용차로 설치 위치에 따라 A~D의 4개의 주 시나리오를 설정
 - **시나리오 A :** 자율주행차와 일반차가 도로를 공유하는 **혼입운행**
 - **시나리오 B :** 버스전용차로를 버스와 자율주행차가 공유하는 **버스전용차로 공유**
 - **시나리오 C :** 버스전용차로 현재와 같이 최우측(보도변)에 두고 버스전용차로의 좌측에 전용차로를 설치하는 **버스좌측전용차로**
 - **시나리오 D :** 자율주행전용차로를 가장 우측(보도변)에 설치하고 전용차로 우측에 버스전용차로를 설치하는 **가로변 전용차로**
- 자율주행차 혼입률의 변화를 7 단계로 구분
 - 혼입률 10%, 20%, 30%, 40% 50% 60%, 80%를 적용
- 교통량은 교통영향평가의 2030년 기준 모델링 구간을 교통량의 70% 적용

[표 3-9] 전용차로 효과분석 시나리오별 차로 구성

시나리오	4차로	3차로	2차로	1차로	1차로	2차로	3차로	4차로
A0 (Base)	버스	일반	일반	(지하) 일반	(지하) 일반	일반	일반	버스
A	버스	일반+ 자율주행	일반+ 자율주행	(지하) 일반+ 자율주행	(지하) 일반+ 자율주행	일반+ 자율주행	일반+ 자율주행	버스
B	버스 + 자율주행	일반	일반	((지하) 일반	(지하) 일반	일반	일반	버스 + 자율주행
C	버스	자율주행	일반	(지하) 일반	(지하) 일반	일반	자율주행	버스
D	자율주행	버스	일반	(지하) 일반	(지하) 일반	일반	버스	자율주행

[표 3-10] 자율주행 전용차로 도입 효과분석 시나리오

시나리오	전용차로 운영 방안	자율주행차 혼입률(%)	시나리오 코드
Base	자율주행차 없음	0	A 0
시나리오 A	일반도로에 대한 혼입 운행 (버스 전용차로는 버스만 운행)	10	A 10
		20	A 20
		30	A 30
		40	A 40
		50	A 50
		60	A 60
		80	A 80
시나리오 B	버스전용차로 공유	10	B 10
		20	B 20
		30	B 30
		40	B 40
		50	B 50
		60	B 60
		80	B 80
시나리오 C	버스좌측전용차로	10	C 10
		20	C 20
		30	C 30
		40	C 40
		50	C 50
		60	C 60
		80	C 80
시나리오 D	가로변 전용차로	10	D 10
		20	D 20
		30	D 30
		40	D 40
		50	D 50
		60	D 60
		80	D 80

3.2. 지하차도 지상화와 전용차로 효과분석 시나리오

■ 목적

- 앞장의 시나리오의 모델링을 분석한 결과 지체가 가장 많이 발생하는 구간이 지하차도 진출부인 것으로 나타남
- 이에 지하차도를 지상화하여 이전 시나리오와 비교·분석을 수행하여 개선이 이루어지는 살펴봄

■ 시나리오 구성 : 총 28개

- **시나리오 G : 지하차도 구간을 지상화**하는 시나리오로 앞에서 설정한 시나리오 B~D 와 전용차로의 위치는 동일
 - 앞의 B~D 시나리오 명칭에 G를 붙여 구분
- **시나리오 E : 지하차도 구간을 지상화**한 후 도로의 중앙에 자율주행전용차로를 설치하는 **중앙전용차로** 운영 효과 분석

※ 기본 시나리오에서 비교 대상이 없으므로 별도의 시나리오 명을 부여함

[표 3-11] 지하차도 지상화 시나리오의 차로 배치

시나리오	4차로	3차로	2차로	1차로	1차로	2차로	3차로	4차로
GB	버스 + 자율주행	일반	일반	일반	일반	일반	일반	버스 + 자율주행
GC	버스	자율주행	일반	일반	일반	일반	자율주행	버스
GD	자율주행	버스	일반	일반	일반	일반	버스	자율주행
E	버스	일반	일반	자율주행	자율주행	일반	일반	버스

[표 3-12] 지하철도 지상화와 자율주행 전용차로 도입 효과분석 시나리오

시나리오	네트워크 변화	전용차로 운영 방안	자율주행차 혼입률(%)	시나리오 코드	관련 시나리오
시나리오 G	지하차도의 지상화	버스전용차로 공유	10	GB 10	시나리오 B
			20	GB 20	
			30	GB 30	
			40	GB 40	
			50	GB 50	
			60	GB 60	
			80	GB 80	
		버스좌측전용차로	10	GC 10	시나리오 C
			20	GC 20	
			30	GC 30	
			40	GC 40	
			50	GC 50	
			60	GC 60	
			80	GC 80	
		가로변 전용차로	10	GD 10	시나리오 D
			20	GD 20	
			30	GD 30	
			40	GD 40	
			50	GD 50	
			60	GD 60	
			80	GD 80	
시나리오 E	중앙전용차로	10	E 10	-	
		20	E 20		
		30	E 30		
		40	E 40		
		50	E 50		
		60	E 60		
		80	E 80		

4. 시뮬레이션 분석 결과

4.1. 전용차로 효과 분석 결과

1) Base 시나리오(A0)

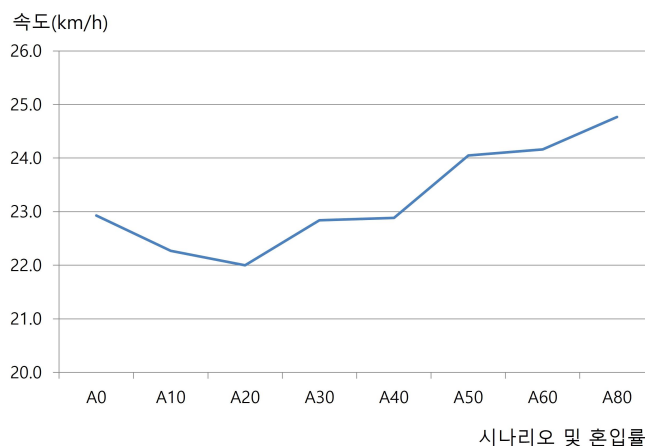
- 분석 구간의 일반 차량의 평균 통행속도는 14.7km/h로 상당히 느린 것으로 나타남.
첨두시간임을 고려하면 이상 값은 아닌 것으로 분석됨
 - 북→남방향의 차량 속도(11.9km/h)가 남→북방향의 차량 속도(18.9km/h)보다 낮아 교통량의 차이가 큰 것으로 나타남
- 버스의 경우 버스 전용차로를 이용할 수 있으므로 19.1km/h로 일반차에 비해 높음
 - 버스 역시 북→남방향의 차량 속도(18.7km/h)가 남→북방향의 차량 속도(22.0km/h)보다 낮긴 하지만 일반차량에 비해서는 차이 적어 버스전용차로 효과 큰 것으로 나타남

[표 3-13] Base 시나리오의 네트워크 지표값

구분	평균 통행 속도(km/h)	차량당 평균 통행시간(초)	차량당 평균 지체(초)
일반차	14.7	1,285.4	980.5
버스	19.1	851.6	536.8

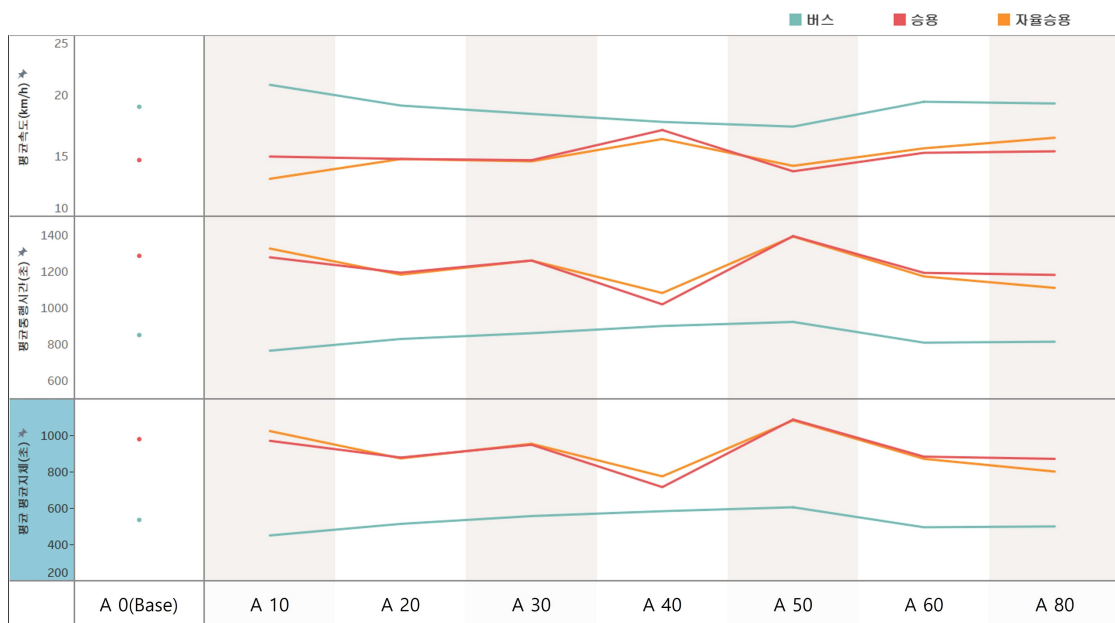
2) 시나리오 A : 자율주행차와 일반차 혼입 운행

- 네트워크 전체적으로 자율주행차의 비율이 낮은 초기에는 차량의 흐름(통행속도 기준)에 악영향을 주지만, 전반적으로 차량 흐름이 개선됨



[그림 3-17] 시나리오 A의 네트워크 평균통행속도(km/h)

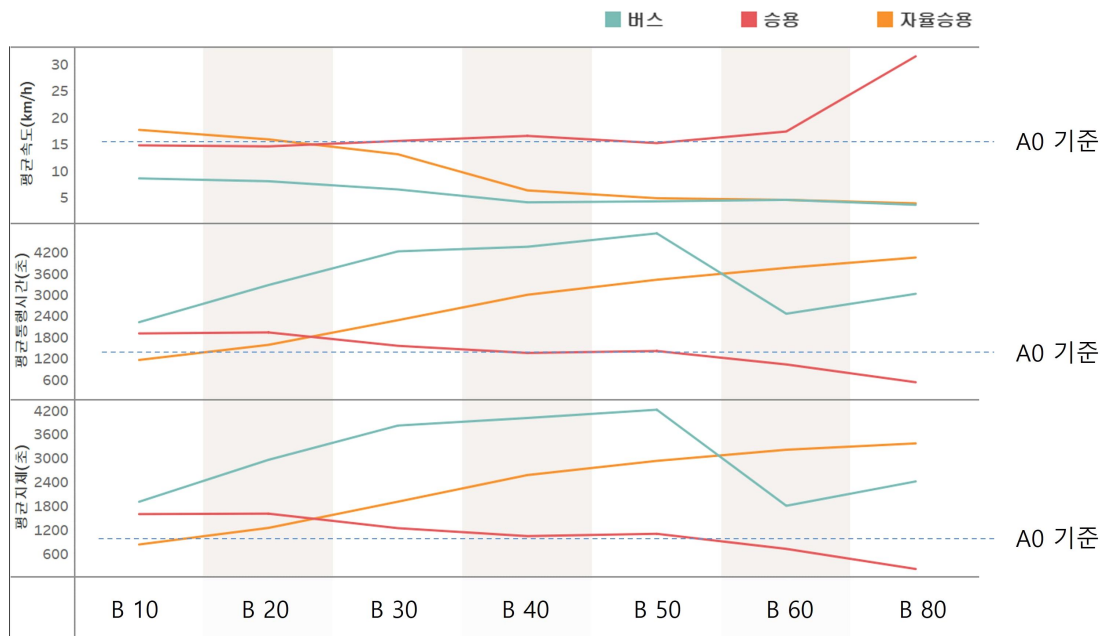
- 반면 분석구간은 차량정체로 인해 통행속도, 통행시간, 지체 등 지표 전반적으로 일반차와 자율주행차의 차이 없는 것으로 나타남
 - 자율주행차가 증가하면서 점차 지표의 개선이 있으나 크지 않음
 - 버스의 경우 혼입률 50%까지 오히려 속도 등 흐름이 나빠지다가 점차 개선됨
- 자율주행차와 일반차가 혼입 운영을 하는 경우 현재에 비해 큰 개선이나 악화는 없는 것으로 나타남
- 이는 자율주행차의 비율이 증가하더라도 큰 차이가 없는데, 주요 원인은 과도한 교통량과 교차로에서는 빈번한 정지로 인한 것을 추정됨
 - 평균통행시간과 평균지체를 살펴보면 자율주행차 유무에 상관없이 A0과 비슷하므로 대부분의 정체가 교차로 등에서의 대기로 인한 것으로 추정됨



[그림 3-18] 시나리오 A의 혼입률 변화에 따른 통행상태 변화

3) 시나리오 B : 버스전용차로 공유

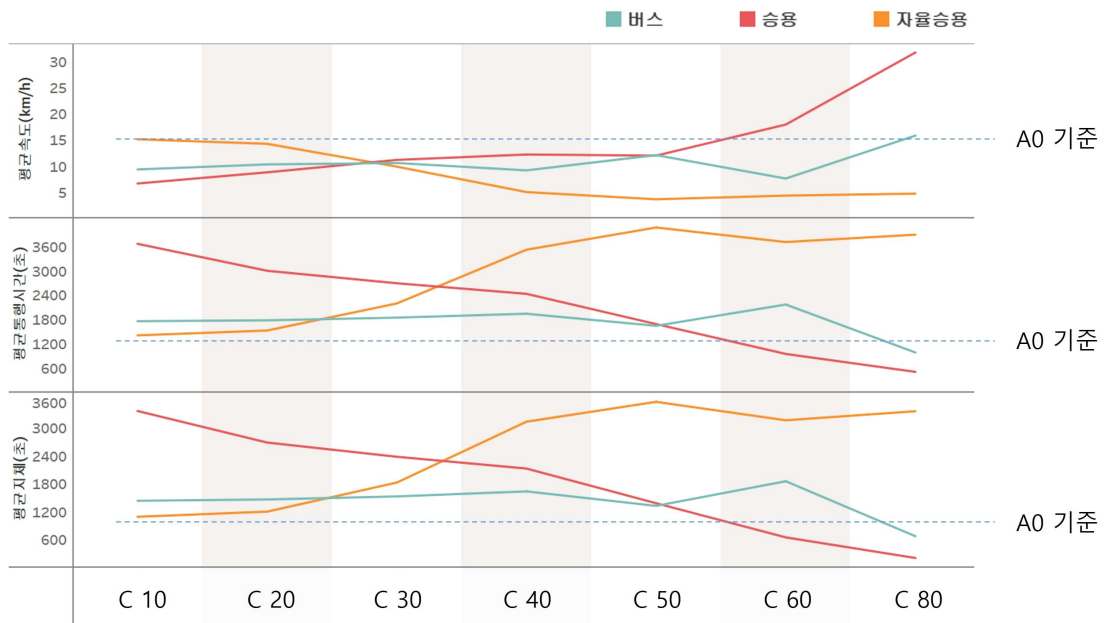
- 버스전용차로를 일반차와 자율주행차가 공유하므로 인해 가장 큰 영향을 받는 것은 버스로 나타났으며, 자율주행차의 비율이 증가할수록 버스 통행의 상태가 악화됨(속도 감소, 통행시간 및 지체 증가)
- 일반차의 경우 자율주행차의 비율이 낮을 때에는 현 상태보다 약간의 개선이 있지만, 혼입률 60%를 기점으로 급격하게 증가
 - 이는 당연하게도 버스전용차로에 자율주행차가 집중되므로 인한 변화
- 자율주행차는 초기 혼입률 10~20% 수준에서는 통행속도 등 차량 흐름 측면에서 이득이 큰 것으로 나타났으나, 혼입률 30% 이후에는 악화됨
 - 따라서 혼입률 30%가 버스전용차를 공유하는 한계 비율로 판단됨



[그림 3-19] 시나리오 B의 차종별 지표 변화

4) 시나리오 C : 버스좌측전용차로

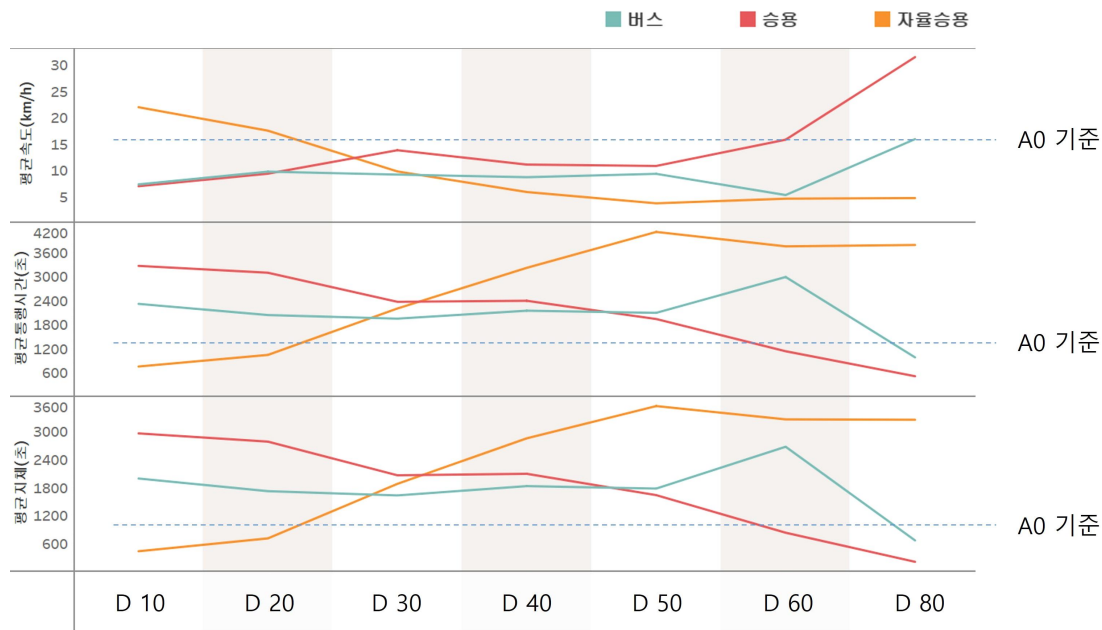
- 버스전용차로의 좌측에 자율주행 전용차로를 설치하는 경우 모든 차종에서 차량 흐름이 악화됨
- 일반차의 경우 차선이 하나 줄어드는 효과가 있으므로 가장 상황이 안 좋아졌으며, 혼입률 60%를 기점으로 차량 흐름이 급격하게 개선됨
- 자율주행차는 초기 혼입률 10~20% 수준에서는 통행속도 등 차량 흐름 측면에서 현재의 차량 통행 흐름에 비해 큰 이득이 없었으나, 불이익도 없음. 그러나 혼입률 30% 정도에서 전용차로에 차량이 집중되어 상황이 악화됨
- 버스의 경우 버스전용차로를 활용할 수 있지만, 통행상태가 안 좋아지는데, 이는 버스전용차로에서 빠져나오고 들어가고 할 때의 상충과 가로변이 버스전용차로이므로 우회전 차량과의 상충으로 인한 문제로 나타남



[그림 3-20] 시나리오 C의 차종별 지표 변화

5) 시나리오 D : 가로변 전용차로

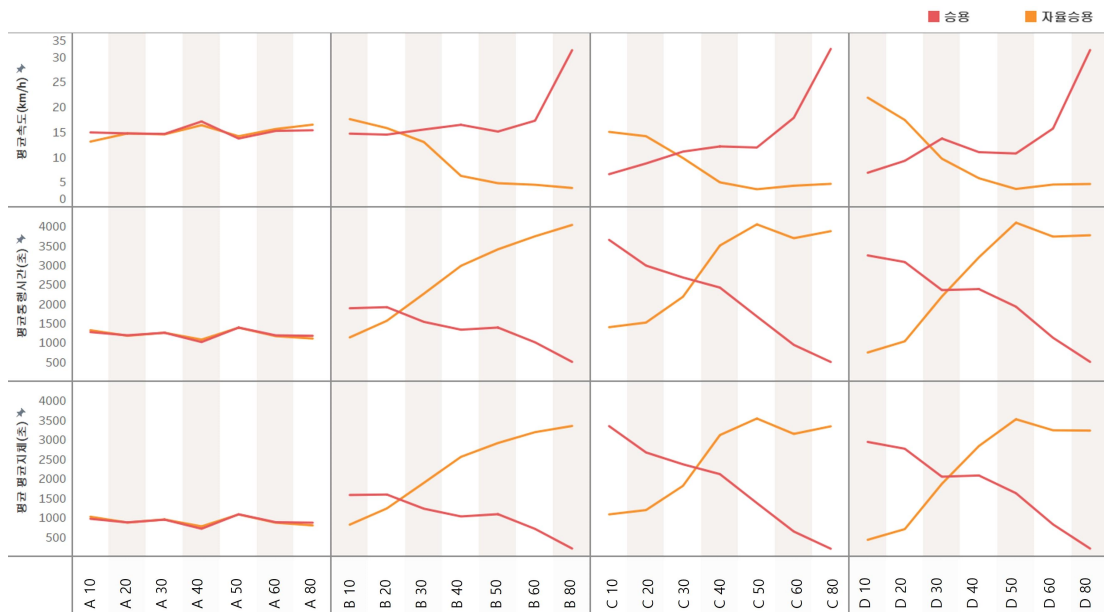
- 전용차로를 가로변에 설치하는 경우 자율주행차는 혼입률 20%까지는 현재 (A0)의 평균 속도보다 높았으며, 평균통행시간과 평균 지체 역시 개선됨
- 그러나 일반차량과 버스의 경우 모두 현재보다 상태가 악화됨
- 일반차는 역시 차선이 하나 줄어드는 효과가 있으므로 차량 흐름에 안 좋아졌으며, 혼입률 60%를 기점으로 차량 흐름이 급격하게 개선됨
- 버스의 경우 자율주행차의 혼입률이 증가하여도 차량 흐름이 크게 개선되지 않음



[그림 3-21] 시나리오 D의 차종별 지표 변화

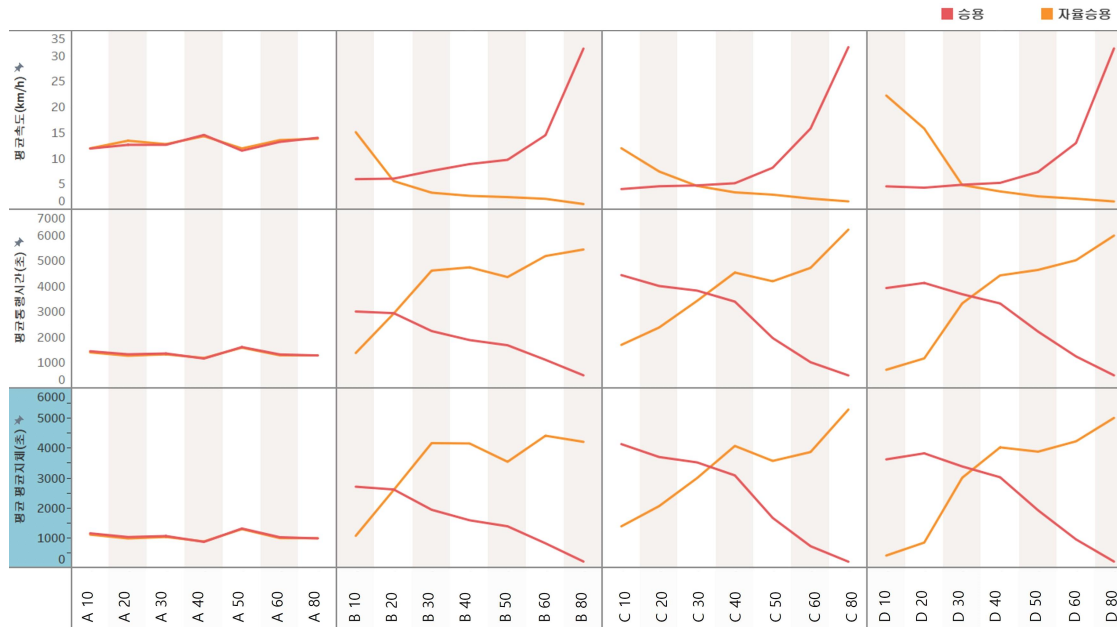
6) 시나리오 결과 비교

- 시나리오 A~D를 비교하면 자율주행 전용차로를 설치하지 않고 일반차와 자율주행차를 혼입 운행하는 경우(시나리오 A)가 자율주행차 혼입률의 변화와 무관하게 효과가 좋은 것으로 분석됨
 - 단순히 평균속도와 지체 등 지표값의 상대적으로 좋은 것 외에도 일반차와 자율주행차 중 특정 한 그룹에 대한 불편이 가중되지 않음
- 전용도로 간의 결과를 비교하면 시나리오 B(버스전용차로 공유)가 혼입률 20% 정도까지는 자율주행차와 일반차의 지표 값의 차이가 가장 적어 초기에 효과가 좋음
- 반면 가로변전용차로(시나리오 D)의 경우 혼입률 30% 정도에서 자율주행차와 일반차 간 지표값의 차이가 가장 적어 상대적으로 효과가 더 좋음
- 버스차로좌측전용차로(시나리오 C) 역시 혼입률 30% 수준에서 일반차와 자율주행차 간의 지표값 차이가 최소가 되지만, 각종 지표값이 B~D 중 가장 낮음

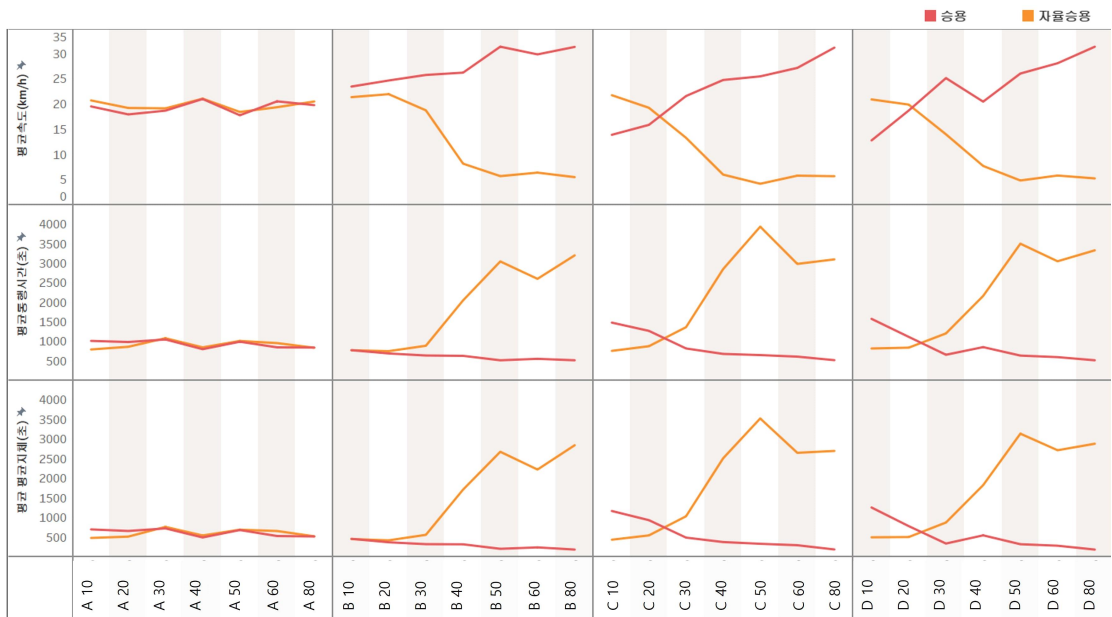


[그림 3-22] 시나리오 A~D 비교

- 시나리오별 지표값은 차량의 진행 방향별로 분리해서 분석하면 교통량이 과밀한 경우 설치 위치에 상관없이 전용차로의 효과가 낮다는 것을 더 명확하게 보여줌
- 침두시 차량의 주 진행 방향인 북→남 방향의 경우 시나리오 B~D 모두 통행속도가 너무 낮게 나와 큰 효과가 없었음
- 반면, 상대적으로 교통량이 적은 남→북 방향의 경우 시나리오 B, C, D의 차이를 보다 명확하게 보여 줌
 - 버스전용차로 공유가 가장 좋으며, 혼입률 30% 수준까지는 일반차와 자율주행차 모두 시나리오 A보다 통행속도 등 지표값이 더 좋은 것으로 나타남
 - 시나리오 D(가로변전용차로) 역시 일반차와 자율주행차 간의 격차는 있지만, 혼입률 20%까지는 시나리오 A와 비슷한 통행 상태를 보여줌



[그림 3-23] 시나리오 A~D 비교(북→남 방향)



[그림 3-24] 시나리오 A~D 비교(남→북 방향)

4.2. 지하철도 구조 개선에 따른 효과 분석

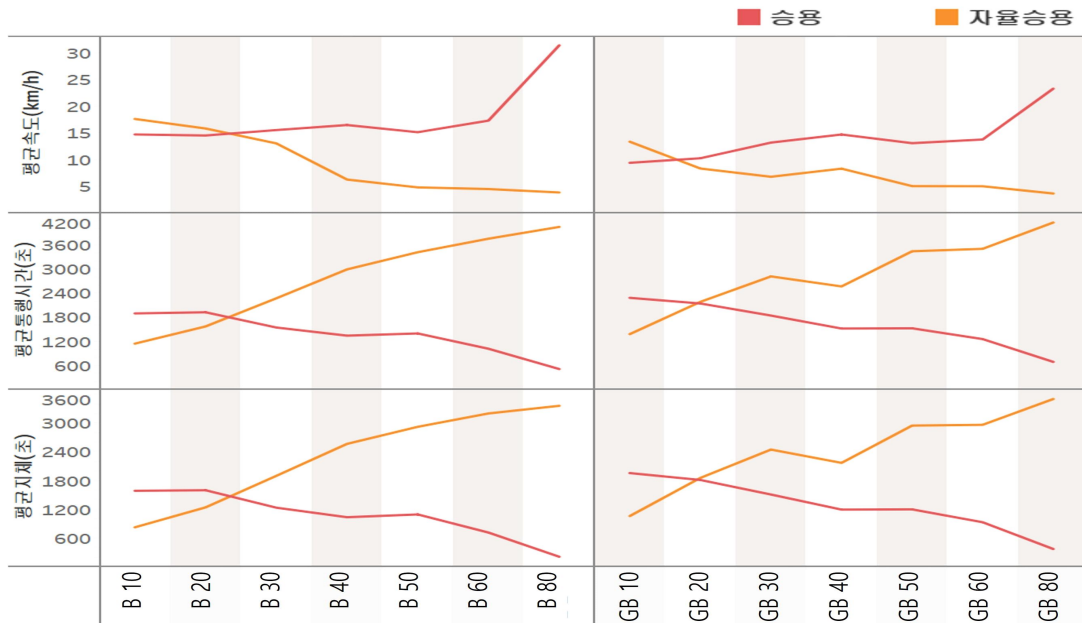
1) 버스전용차로 공유

- 시나리오 B의 버스전용차로 공유를 기준으로 시나리오 GB와 비교
 - 시나리오 B는 버스전용차로를 자율주행차와 버스가 공유, 지하철도 존재
 - 시나리오 GB는 버스전용차로를 자율주행차와 버스가 공유, 지하철도 지상화

[표 3-14] 시나리오 B와 GB의 차로 배치

시나리오	4차로	3차로	2차로	1차로	1차로	2차로	3차로	4차로
B	버스 + 자율주행	일반	일반	(지하) 일반	(지하) 일반	일반	일반	버스 + 자율주행
GB	버스 + 자율주행	일반	일반	일반	일반	일반	일반	버스 + 자율주행

- 버스전용차로를 공유하는 시나리오에서는 지하철도를 지상화하여도 개선이 없는 것으로 나타났으며, 오히려 속도가 낮아지고, 지체가 증가함
- 시나리오 B에서는 혼입률 30% 정도에서 일반차와 자율주행차의 지표값의 차이가 없어졌지만, 시나리오 GB에서는 혼입률 20% 정도에서 지표값의 차이가 없어짐. 즉, 버스와 공유하는 전용차로의 효과가 더 일찍 없어짐



[그림 3-25] 시나리오 B와 GB 비교

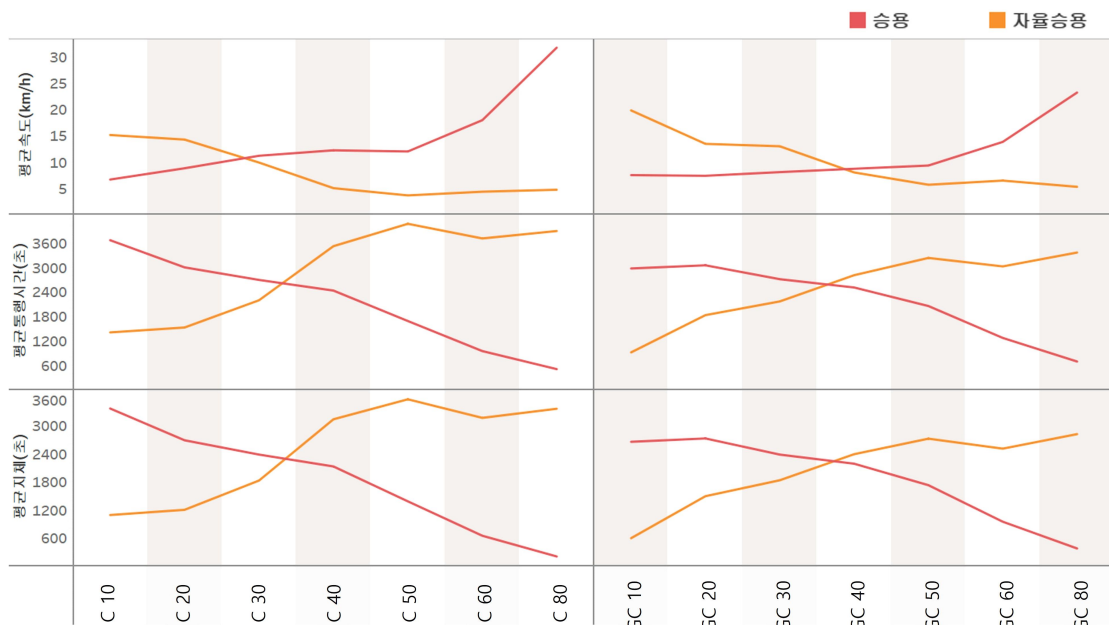
2) 버스좌측전용차로 설치

- 시나리오 C의 의 버스좌측에 전용차로를 설치하는 시나리오를 기준으로 시나리오 GC와 비교
- 시나리오 C는 버스전용차로의 좌측에 자율주행 전용차로 설치, 지하차도 존재
- 시나리오 GC는 버스전용차로의 좌측에 자율주행 전용차로 설치, 지하차도 지상화

[표 3-15] 시나리오 C와 GC의 차로 배치

시나리오	4차로	3차로	2차로	1차로	1차로	2차로	3차로	4차로
C	버스	자율주행	일반	(지하) 일반	(지하) 일반	일반	자율주행	버스
GC	버스	자율주행	일반	일반	일반	일반	자율주행	버스

- 시나리오 C와 GC의 비교결과 역시 지상화의 효과가 거의 없음
- 지하차도의 지상화 후 버스좌측전용차로를 설치하면 혼입률이 40% 수준이 되었을 때 일반차와 자율차의 지표값 차이가 없어짐



[그림 3-26] 시나리오 C와 GC 비교

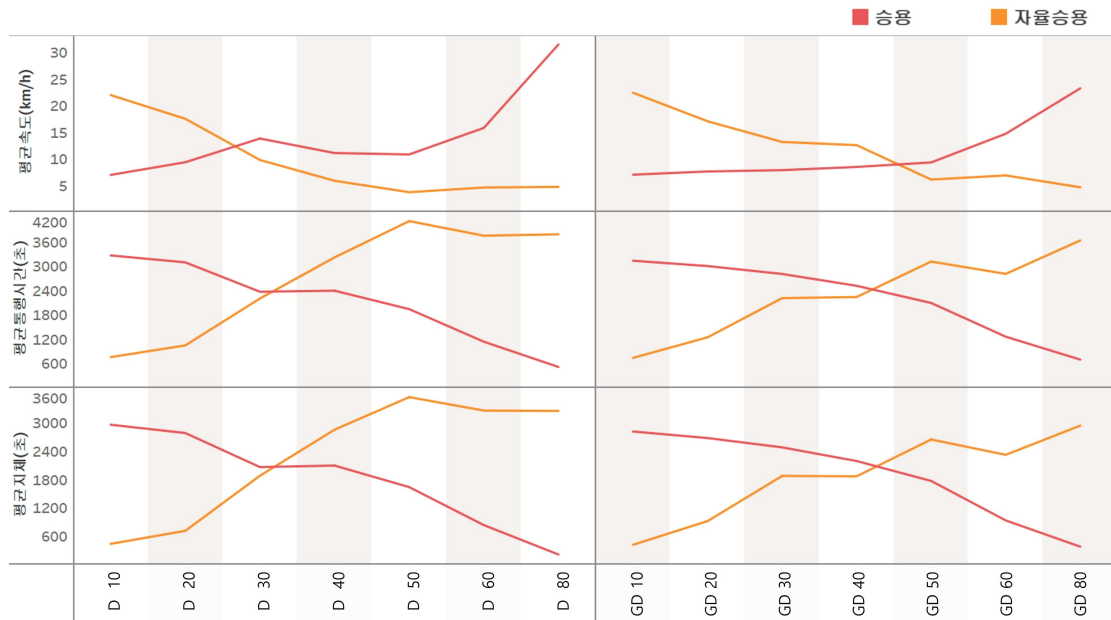
3) 가로변전용차로 설치 비교

- 시나리오 D의 가로변에 전용차로를 설치하는 시나리오를 기준으로 시나리오 GD와 비교
- 시나리오 D는 가로변(도로 최우측)에 자율주행 전용차로 설치, 지하차도 존재
- 시나리오 GD는 가로변(도로 최우측)에 자율주행 전용차로 설치, 지하차도 지상화

[표 3-16] 시나리오 D와 GD의 차로 배치

시나리오	4차로	3차로	2차로	1차로	1차로	2차로	3차로	4차로
D	자율주행	버스	일반	(지하) 일반	(지하) 일반	일반	버스	자율주행
GD	자율주행	버스	일반	일반	일반	일반	버스	자율주행

- 지상화 후 가로변전용차로를 설치하는 경우 역시 속도 등의 지표값의 개선은 없음
- 그러나 시나리오 D에서 자율주행차의 속도, 지체에서의 상대적 이득이 혼입률 30% 초반 이후 사라지는 데 반해 시나리오 GD에서는 혼입률 40%대 중반까지 유지됨



[그림 3-27] 시나리오 D와 GD 비교

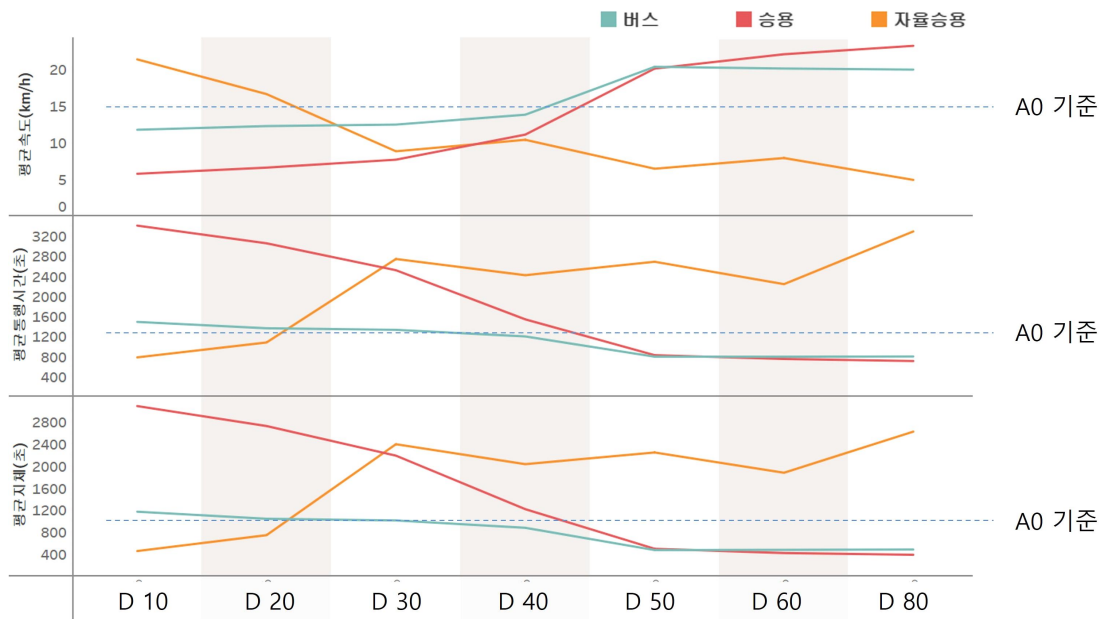
4) 시나리오 E (중앙전용차로)

- 지하차로를 지상화하고 중앙전용차로를 설치한 시나리오로 중앙전용차로의 효과를 간접적으로 파악하기 위함
 - 다만, 직접적으로 비교할 만한 비교 시나리오가 없으므로, 지하차도 지상화 시나리오 간 비교를 수행

[표 3-17] 시나리오 E의 차로 배치

시나리오	4차로	3차로	2차로	1차로	1차로	2차로	3차로	4차로
E	버스	일반	일반	자율주행	자율주행	일반	일반	버스

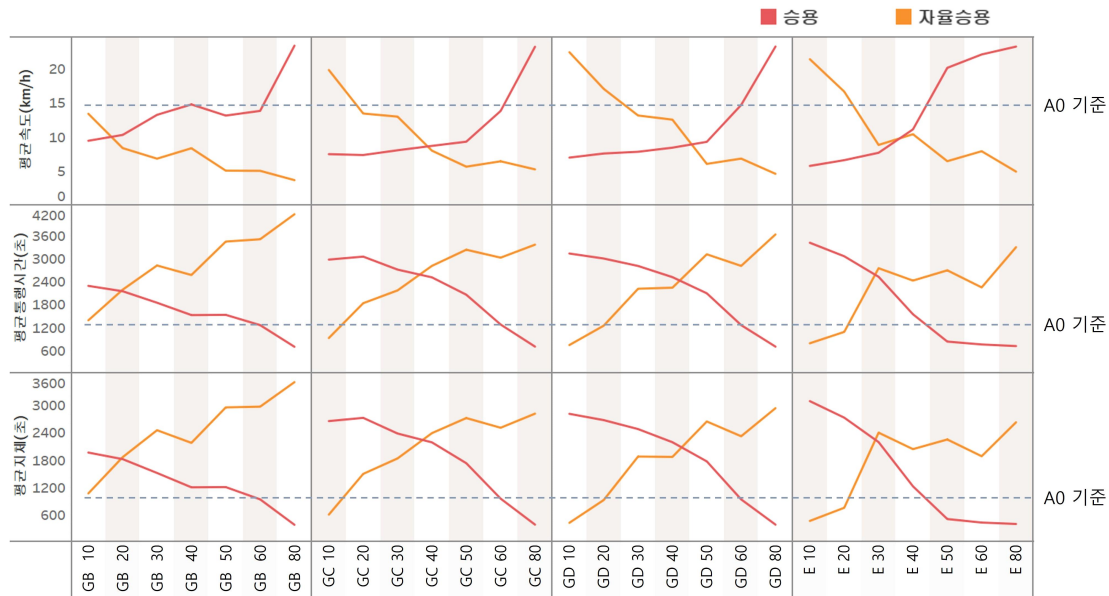
- 지하차로를 지상화하고 중앙전용차로를 설치할 경우 혼입률 10~20% 수준에서는 자율주행차량에는 개선 효과가 있음
- 버스도 초기에 다소 차량 흐름이 악화하기는 하지만 다른 시나리오에 비해서는 양호
- 일반차는 차량 흐름이 안 좋아지기는 하지만, 혼입률 50% 정도가 되면서부터 개선



[그림 3-28] 시나리오 E의 차종별 지표 변화

5) 지상화 시나리오 비교

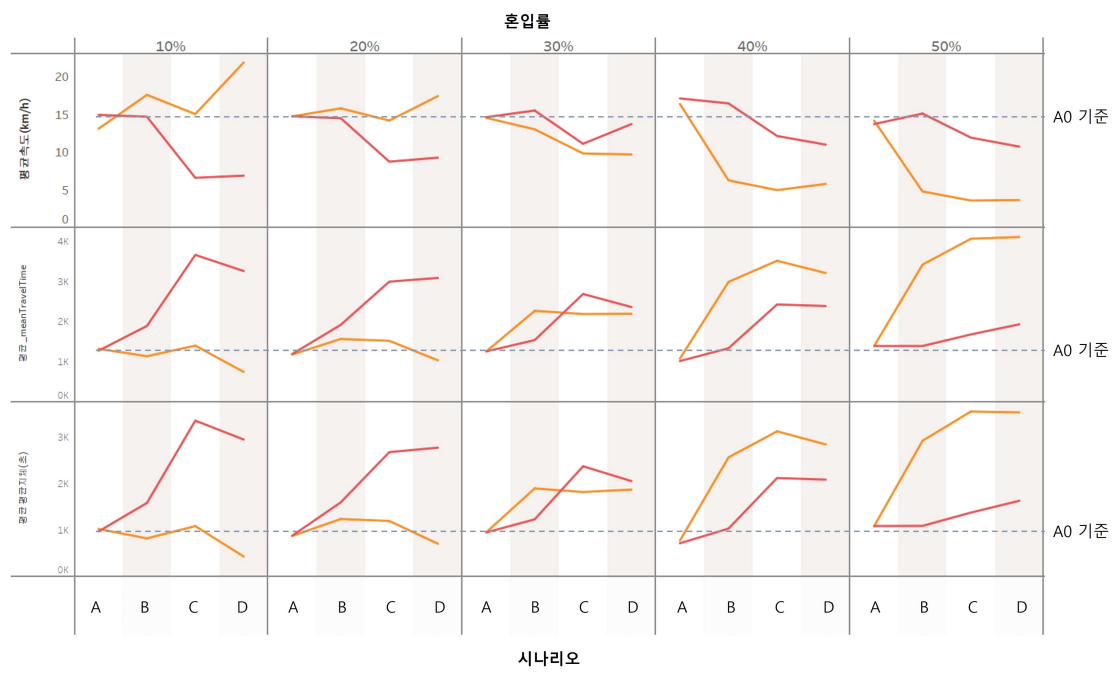
- 지하차도를 지상화하는 시나리오를 비교한 결과 지상화는 전체적으로 차량 흐름의 개선에 영향이 없는 것으로 나타남
- 모든 시나리오에서 현재보다 차량의 흐름이 안 좋아짐. 일반차와 자율주행차 모두에게 악영향
- 개별 시나리오별로 비교하면 버스전용차로 공유(시나리오 GB)가 혼입률 20% 수준까지 가장 양호함
 - 자율주행차의 혼입률이 증가하면 시나리오 GB는 급격하게 자율주행차의 흐름 악화
- 나머지 3개의 전용차로 시나리오는 큰 차이가 없었으며, 혼입률 40% 정도에서 일반차와 자율주행차의 지표값 차이가 최소화되어 혼입률이 일정 수준이 되었을 때 상대적으로 더 효과가 있는 것으로 나타남



[그림 3-29] 지하차도 지상화 시나리오(GB, GC, GD, E) 비교

4.3. 자율주행 전용차로의 효과 정리

- 시뮬레이션 결과 혼입률에 상관없이 자율주행차와 일반차의 혼입운행이 가장 효과가 좋은 것으로 나타남
- 전반적으로 도심 도로에서는 잦은 간격의 교차로와 교차로에서의 신호대기 등으로 인해 발생하는 지체가 더 큰 영향을 미침
- 잦은 교차로 간격은 차선변경이 빈번하게 발생하게 됨을 의미하고, 이는 혼재 상태에서는 자율주행차의 운행여건에 악영향 또는 전체적으로 자율주행차가 장점을 발휘하게 어려운 환경을 조성
- 따라서 전용차로를 설치하여도 도심에서의 좌·우회전 등을 위한 전용차로 진입과 진출이 필수이므로 큰 효과가 없는 것으로 나타남
- 자율주행차의 혼입률에 따른 각 시나리오의 효과를 비교하면 다음과 같음
 - 버스전용차로 공유(시나리오 B)의 경우 혼입률이 20% 정도로 낮은 경우에는 효과가 있는 것으로 나타남
 - 그러나 효과가 있다는 것이 극적인 개선이 있다기보다는 현재의 통행상태와 비슷한 상태를 유지한다는 의미
 - 혼입률이 30%가 넘어가면 전용차로를 이용해야 하는 자율주행차가 많아지면서 효과가 없어짐
 - 그러나 자율주행차만을 고려하면 혼입률 10~20%에서는 가로변 전용차로(시나리오 D)가 가장 좋은 것으로 나타나지만, 일반차의 통행 불이익이 높아짐
 - 혼입률 30%일 때 전반적으로 자율주행차와 일반차 간의 지표 값의 차이가 가장 적어 전용차로를 설치하고자 한다면 혼입률 30%일 때가 적합한 시기
- 혼입률이 40% 이상이 되면 사실상 전용차로는 설치할 이유가 없는 것으로 나타남
 - 편도 4차로 이상인 분석구간에서 1개 차선을 전용차로로 주는 구조에서는 혼입률 40%에서는 전용차로의 혼잡이 더욱 가중되어 이득이 없음
 - 본 분석을 바탕으로 편도차선의 수에 따라 전용차로가 효과를 발휘하는 비율이 다를 것으로 추론됨
- 결과적으로 전용차로의 경우 순수하게 차량 흐름만을 고려한다면 자율주행차 혼입률이 20% 이내인 환경에서 버스전용차로와 공유하는 형태가 가장 적합함



[그림 3-30] 전용차로 시나리오 A~D의 혼입률별 비교

제4장 전용차로 설치 및 운영 방향 제안

1. 고양창릉의 전용차로 설치 및 운영 방향 제안

■ 운영 환경 전제 조건

- 설치 및 운영 제안은 고양창릉에 국한하며, 아래의 조건을 충족하는 경우로 한정
- 기본적으로 분석 대상지의 차선구성인 편도 4차선을 기준으로 함
- 버스전용차로 운영 시 버스통행량은 시간당 150대 정도이며, 가로변 버스전용차로 운영

■ 기본방향

- 자율주행 전용차로의 설치는 자율주행차 확산 초기에 상용화를 지원하고, 이용자의 편의를 제공하기 위함
- 자율주행차 이용자에게 일정 수준의 통행 편의를 제공할 수 있지만, 원칙적으로 일반차 이용자에게 과도한 불이익을 주지 않는 방향에서 운영
- 혼입률 20~30% 수준까지만 필요 시 전용차로 운영
- 가능한 차선 변경을 최소화하기 위해 중앙, 가로변 등 전용차로 위치의 일관성 유지
 - BRT 등 버스전용차로가 있는 구간은 버스전용차로와 공유하는 형태의 전용차로(버스전용차로공유형)로 운영
 - 버스전용차로가 없는 구간은 가로변 전용차로 설치 원칙
- 혼입률 20% 이상이 되면 원칙적으로 전용차로 폐지 검토 및 혼입률 30%이상이면 폐지
- 전용차로 설치 권장 교통량은 구간별 최대 교통량이 시간당 1,200대 이하
 - ※ 현재까지 명확하게 규정된 수치는 없지만, 본 연구에서 사용한 데이터값을 기준으로 추정함
 - ※ 본 연구에서 구간 최대 교통량은 시간당 1,597대이며, 이 정도 교통량에도 정체로 인해 자율주행이 제 성능을 발휘하기 어려움

※ 도로교통연구원의 고속도로를 대상으로 한 모델링에서는 진출입 교통량이 시간 600대와 1,200대로 구분하여 분석함

■ 운영 방안

○ 혼입률 ~20% 구간

- 버스전용차로에 자율주행차의 통행을 허용하여 혼란과 일반차의 이용불편을 최소화
- 버스전용차로가 없는 구간은 가로변 전용차로 운영

○ 혼입률 20%~30% 구간

- 전용차로 완전폐지 전까지 과도기적 단계로 버스전용차로 공유는 유지하고, 다른 차로는 혼입운행으로 전환
- 가로변 전용차로의 계속 운영 및 타 차로의 혼입운행

○ 혼입률 30% 이상 구간

- 버스전용차로 공유는 폐지하고 버스전용차로로 전환하고 나머지 차로는 일반차와 자율주행차의 혼입운행
- 모든 차로에 대해 일반차와 자율주행차의 혼입운행

[표 4-1] BRT 설치 구간에 대한 단계적 전용차로 운영(안)

혼입률	4차로	3차로	2차로	1차로	1차로	2차로	3차로	4차로
~20%	버스+ 자율주행	일반	일반	(지하) 일반	(지하) 일반	일반	일반	버스+ 자율주행
20~30%	버스+ 자율주행	일반+ 자율주행	일반+ 자율주행	(지하) 일반+ 자율주행	(지하) 일반+ 자율주행	일반+ 자율주행	일반+ 자율주행	버스+ 자율주행
30%~	버스	일반+ 자율주행	일반+ 자율주행	(지하) 일반+ 자율주행	(지하) 일반+ 자율주행	일반+ 자율주행	일반+ 자율주행	버스

[표 4-2] BRT 미 설치 구간에 대한 단계적 전용차로 운영(안)

혼입률	4차로	3차로	2차로	1차로	1차로	2차로	3차로	4차로
~20%	자율주행	일반	일반	일반	일반	일반	일반	자율주행
20~30%	자율주행	일반+ 자율주행	일반+ 자율주행	일반+ 자율주행	일반+ 자율주행	일반+ 자율주행	일반+ 자율주행	자율주행
30%~	일반+ 자율주행	일반+ 자율주행	일반+ 자율주행	일반+ 자율주행	일반+ 자율주행	일반+ 자율주행	일반+ 자율주행	일반 자율주행

2. 일반적인 신도시에서의 전용차로 설치 및 운영 방향 제안

■ 운영 환경 전제 조건

- 다음의 목적을 위해 추가적인 여건 분석 후 설치 운영 가능
 - 교통량이 과도하여 정체가 발생하는 구간에서 제한적으로 자율주행차에 편의를 제공하기 위해 설치
 - 자율주행 셔틀, DRT, 버스 등 자율주행 승용차 이외의 자율주행 수단의 이동과 이용자 편의를 동시에 제공
 - 설치 차로수에 비해 교통량이 적은 구간에 한정하여 테스트베드의 운영
- 기본적으로 최소 차로수는 편도 3차선으로 하고, 좌우회전 포켓이 충분히 설치되어 있음
- 원칙적으로 전용차로 설치를 권장하지 않음

■ 운영 방안

- 혼입률 20%까지는 가로변 전용차로로 설치하며, 자율주행 기반의 교통수단 통행 허용
- 혼입률이 20% ~ 30% 구간에서는 과도기적 단계로 가로변 전용차로는 유지하고, 나머지 차로는 일반차와 자율주행차 혼입운행
- 혼입률이 30% 이상이 되면 가로변 전용차로를 자율주행 기반 대중교통수단 전용으로 전환
 - 나머지 차로는 일반차와 자율주행차 혼입운행
 - 일반차와 자율주행차는 가로변에 승·하차 등 임시 정차를 위해서 특정 구역(Flex Zone 등)만 이용하도록 제한 운영

[표 4-3] 신도시의 자율주행 전용차로 운영 방안(안)

혼입률	3차로	2차로	1차로	1차로	2차로	3차로
~20%	자율주행	일반	일반	일반	일반	자율주행
20~30%	자율주행	일반+ 자율주행	일반+ 자율주행	일반+ 자율주행	일반+ 자율주행	자율주행
30%~	자율주행 대중교통	일반+ 자율주행	일반+ 자율주행	일반+ 자율주행	일반+ 자율주행	자율주행 대중교통

3. 전용차로 설치 및 운영을 위한 고려사항

- 자율주행 전용차로의 설치에 단순히 차로를 중앙, 가로변 등 위치를 정해서 설치하는 문제로 종결되지 않음
- 전용차로 설치를 위해 해결해야 하는 다수의 문제가 있음
- 특히, 고속도로와 같이 정지가 최소화되는 연속류와 달리 도심에서는 교차로에서의 정지, 좌우회전을 위한 빈번한 차선 변경, 침두시간의 과도한 교통량 등 자율주행의 장점을 상쇄하는 다수의 요인이 존재
- 그 중에서 중요한 다음의 3가지 사항에 대해 충분한 검토가 필요함

■ 자율주행차의 성능의 한계

- 초기 자율주행이 부상하던 시기의 기대와 달리 현재 자율주행차의 실제 운동성능은 일반 운전자의 운전 능력보다 뛰어나지 않음
 - ※ 기술적으로는 현재도 더 뛰어나지만, 비학습 상황, 안전 문제로 인한 제한 등으로 인해 제 성능을 발휘하기 어려움
- 반면 대부분의 전용차로 및 자율주행관련 연구는 모델링을 기반으로 하며, 자율주행차의 성능이 일반운전자보다 우수하다는 전제로 진행됨
- 따라서 자율주행차가 시대 초기에는 자율주행차가 기대 만큼의 효과를 발휘하지 못할 것이 분명함
- 특히, 고속도로보다 상황이 더 복잡한 도심 도로의 경우 자율주행차 도입은 도로 용량 저하의 가능성이 높음
- 그러므로 전용차로의 설치에 차량 흐름 개선, 자율주행차 확대 지원 등의 도입 목적에 따라 신중히 판단하여 도입 필요

[표 4-4] 자율주행차와 일반차의 성능비교

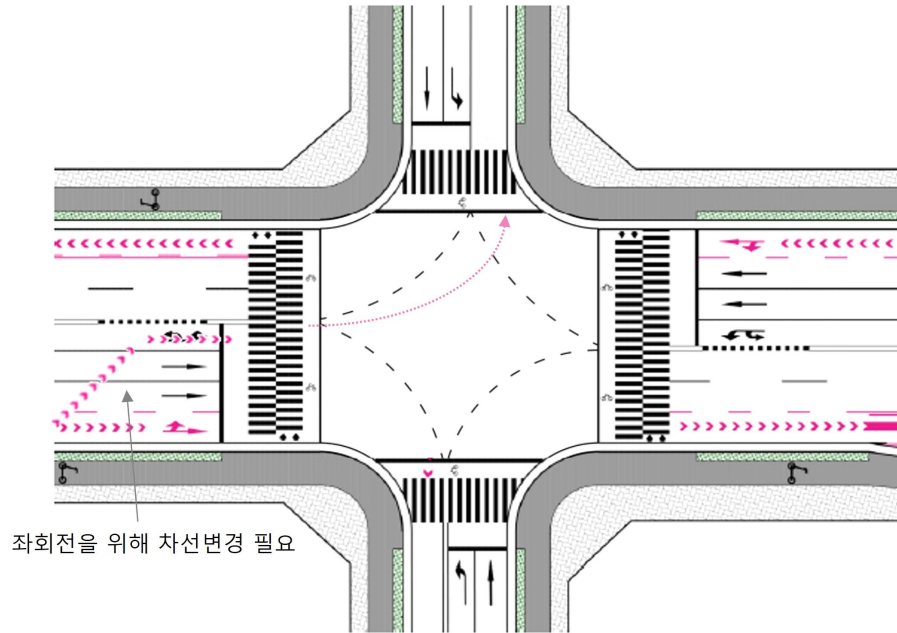
분류	구분		AVs (동승+실데이터)	HDVs
직진	인지반응속도(초)	앞차와 반응	2.18	1.29
		신호 반응	1.48	1.73
	신호대기 시 안전거리(m)		8.17	3.37
	속도(km/h)		23.48	28.11
	Headway(초)	1~4번 차량	3.97	2.70
		5번 이후 차량	2.08	1.99
	포화교통류율(pc/h/ln)		1,731	1,809
우회전	우회전 소요시간(초)		6.03	4.65
	저속수행중 안전거리(Gap, m)		18.06	12.70
	속도(km/h)		11.19	13.95
	Headway(초)		6.30	3.06

자료 : 윤덕근 (2023), “자율주행시대 도로 인프라 변화 방향”, 자율주행 공청회 발표자료, 2023.11.07.

■ 교차로에서의 통행 방법

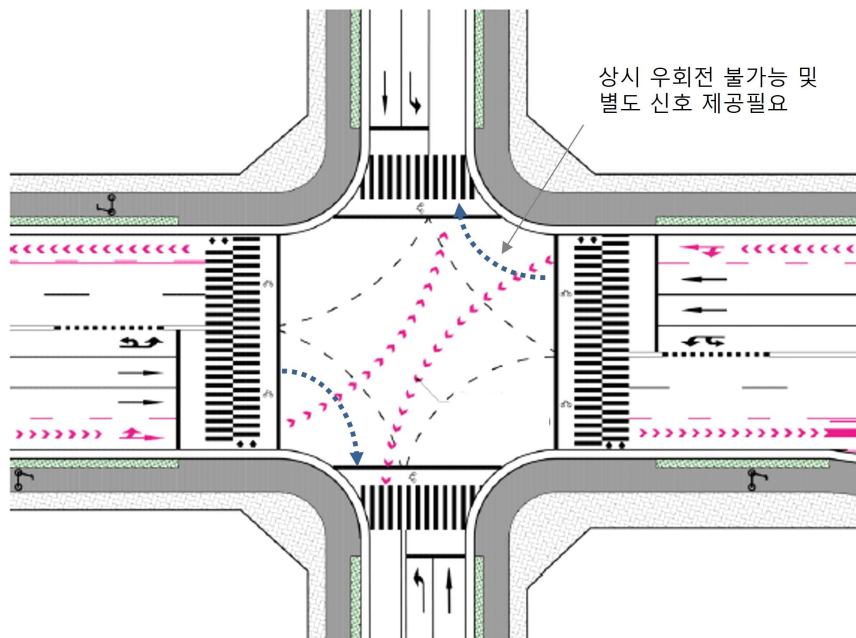
- 도심의 주행환경에서 일반차와 자율주행차 모두 교차로에서의 통행이 가장 문제가 될 수 있음
- 특히, 전용차로를 운영할 경우 설치 위치에 따라 교차로 시점부, 종점부, 좌회전과 우회전 방식에 대한 면밀한 계획과 검토가 필요
 - 예를 들어 가로변 전용차로를 설치할 경우 좌회전을 어떻게 주느냐와 일반차의 우회전 시 상충을 어떻게 처리하느냐가 중요한 문제
 - [그림 4-1]의 방식은 본 연구의 모델링에서 사용하고 일반적으로 운영되는 방식으로 자율주행차 역시 좌회전을 위해서는 1차선으로 차선변경이 필요
 - 이 방식은 차선변경으로 인한 일반차와의 상충과 지체가 발생
 - ※ 본 모델링 과정에서 혼잡도로에서는 항시 목격되는 주요 정체 원인
 - [그림 4-2]의 방식은 건설기술연구원 R&D에서 고려 중인 방식으로 전용차로에서 바로 좌회전을 허용하는 방식
 - 자율주행차가 차선변경이 필요 없다는 장점이 있을 수 있으나, 일반차량의 상시 우회전이 불가능하며, 혼선을 최소화하기 위해 별도의 신호가 필요
 - 예로 자율주행차 전용 신호를 주고, 일반차 좌회전, 자율주행차 우회전, 좌회전, 직진을 동시에 허용, 일반 차의 우회전 역시 별도의 신호를 주든지, 자율주행차가 없을 때만 허용

- 이러한 방식은 자율주행차의 비율이 적을 때는 운영이 용이하지만 다분히 현장에서의 혼선으로인해 안전 문제가 야기됨



[그림 4-1] 전용차로 운영시 교차로 좌회전 방식 예시 1

자료 : 윤덕근 (2023), “자율주행시대 도로 인프라 변화 방향”, 자율주행 공청회 발표자료, 2023.11.07.를 참고하여 저자 작성

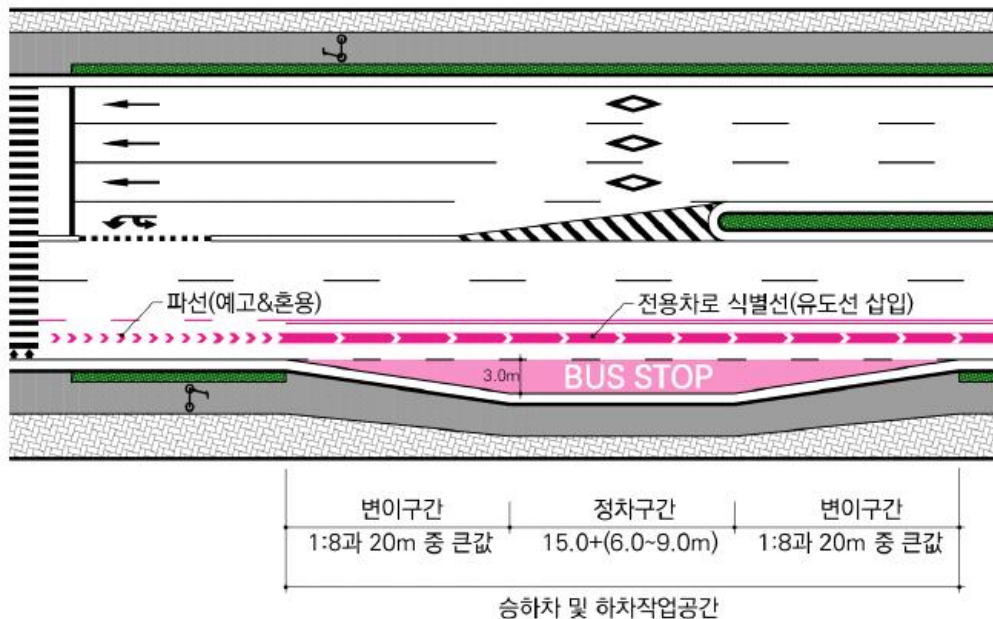


[그림 4-2] 전용차로 운영시 교차로 좌회전 방식 예시 2

자료 : 윤덕근 (2023), “자율주행시대 도로 인프라 변화 방향”, 자율주행 공청회 발표자료, 2023.11.07.를 참고하여 저자 작성

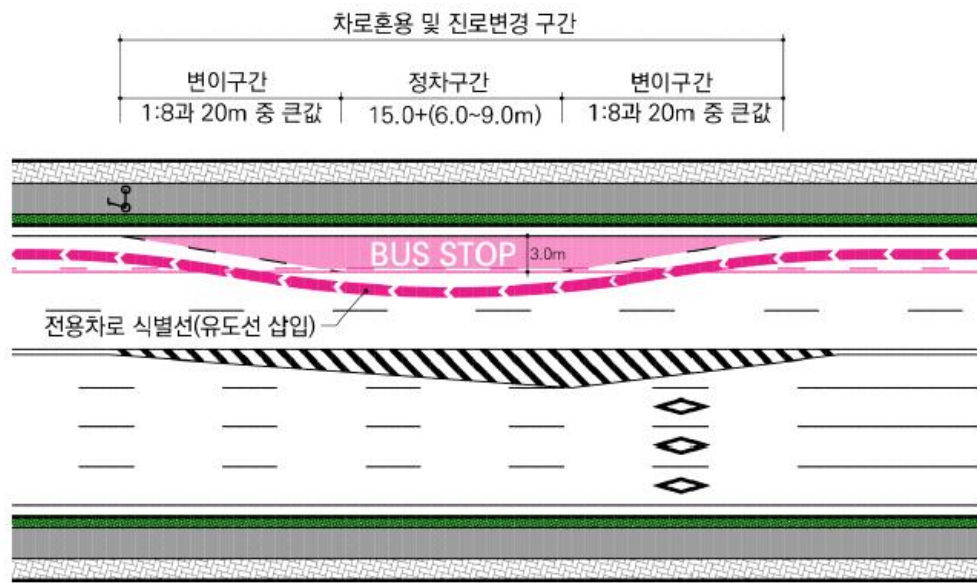
■ 버스 정류장 등 가로변 이용시설에 따른 가로공간 설계와 일반차 처리

- 도심의 가로변에는 버스 정류장 등 필수 이용시설이 다수 존재
- 전용차로를 중앙에 설치하는 경우 이런 시설에 의한 문제가 적을 수 있으나, 가로변에 설치할 경우 가로변 시설을 이용하려는 타 수단과의 상충 문제가 발생
- 버스 정류장을 예로 들면 보도의 폭에 따라 보도 폭을 줄 일 공간이 있는 경우에는 버스 정류장을 베이형으로 설치하고, 버스만 전용차로에 잠시 출입하는 것을 허용할 수 있음
- 반면, 보도 폭을 줄이기 어려운 경우에는 자율주행차량이 버스 정류장 앞에서 일반차량과 잠시 혼입운행하는 구간이 필요함
- 이런 경우 어떻게 운영할 것인가에 대한 자율주행차의 비율과 예상 이용 규모에 따라 다양한 방식으로 충분한 연구와 검토가 필요
- 그리고 가로변 공간에 대한 적절한 설계 가이드 역시 검토 필요



[그림 4-3] 버스정류장 부 설계 예시(보도 폭 축소 가능)

자료 : 윤덕근 (2023), “자율주행시대 도로 인프라 변화 방향”, 자율주행 공청회 발표자료, 2023.11.07.



[그림 4-4] 버스정류장 부 설계 예시(보도 폭 축소 불가능)

자료 : 윤덕근 (2023), “자율주행시대 도로 인프라 변화 방향”, 자율주행 공청회 발표자료, 2023.11.07

제5장 결론

1. 연구결과

- 본 연구는 고양창릉을 대상으로 자율주행 전용차로를 도입했을 때의 효과를 분석하고, 적절한 설치 및 운영 방향을 도출하는 것을 목적으로 함
- 전용차로 관련 기존 연구와 설치 사례를 조사함
 - 기존 연구는 고속도로와 같은 연속류를 대상으로 연구가 주로 수행됨
 - 고속도로 대상 기존 연구의 결과는 다음과 같음
 - 혼입률 10~20% 시기에는 전용차로 도입은 일반차로에 과포화를 발생시켜 일반차운전자의 불이익이 큼
 - 혼입률이 30~40%일 경우 전용차로의 효과를 볼 수 있으나, 합류구간과 분류구간에 대한 처리가 주요 문제
 - ※ 명확하게 어떤 방식이 좋다는 결론에 도달하지 못 함
 - 혼입률 30%까지 우측에, 30~70%까지는 전용차로가 없는 것이, 그 이상일 경우 좌측에 전용차로 2개 설치하는 것이 효율성 및 안전성 측면에 유리
 - 도심도로를 대상으로 하는 연구는 최근에 다시 검토가 되고 있음
 - 전용차로 설치는 미국과 중국이 주도적이며, 일본이 참여하고 있음
 - 설치 계획 모두 고속도로에서 이루어지며, 중앙차선을 전용차로로 설치
 - 도심도로 대상 기존 연구의 결과는 다음과 같음
 - 전반적으로 전용차로가 효과를 발휘하기에는 도심의 주행 여건이 좋지 않음
 - 설치한다면 중앙전용차로(좌측전용차로)가 가로변전용차로(우측전용차로)보다 효과적
 - 다만, 중앙과 가로변의 효과에 대한 연구는 아직 수행 중이며, 다른 결과를 제시하는 연구도 있음
 - ※ 아직 미발표 자료이므로 제시하지 않음

- 고양창릉 지구를 대상으로 다양한 전용차로 운영 시나리오를 제시하고 효과를 분석함
 - 크게 4개의 시나리오를 제시 : 무설치(자율주행차와 일반차 혼입 운행), 버스전용차로 공유, 가로변 설치, 버스차로좌측설치
 - 분석결과 는 다음과 같음
 - 시뮬레이션 결과 혼입률에 상관없이 자율주행차와 일반차의 혼입운행이 가장 효과적
 - 버스전용차로 공유(시나리오 B)의 경우 혼입률이 20% 정도로 낮은 경우에는 효과가 있는 것으로 나타남
 - 자율주행차만을 고려하면 혼입률 10~20%에서는 가로변 전용차로가 가장 좋은 것으로 나타나지만, 일반차의 통행 불이익이 커짐
 - 혼입률 30%일 때 전반적으로 자율주행차와 일반차 간의 지표 값의 차이가 가장 적어 전용차로를 설치하고자 한다면 혼입률 30%일 때가 적합
 - 혼입률이 40% 이상이 되면 사실상 전용차로는 설치할 이유가 없는 것으로 나타남
 - 전용차로의 경우 순수하게 차량 흐름만을 고려한다면 자율주행차 혼입률이 20% 이 내인 환경에서 버스전용차로와 공유하는 형태가 가장 적합함
- 전용차로 운영 시나리오의 분석 결과와 1단계 연구에서 도출한 주요 문제 구간인 지하차도를 지상화하는 대안을 검토함
 - 지하차도를 지상화 하여도 전용차로의 효과에 큰 영향이 없음
 - 따라서 지하차도 유출입부에서의 문제보다 다른 문제가 큰 것으로 유추됨
- 모델링을 통해 도심 도로에서의 자율주행차 운행의 주 영향 요인을 추정함
 - 전반적으로 도심 도로에서는 잦은 간격의 교차로와 교차로에서의 신호대기 등으로 인해 발생하는 지체가 더 큰 영향을 미침
 - 잦은 교차로 간격은 차선변경이 빈번하게 발생하게 됨을 의미하고, 이는 혼재 상태에서는 자율주행차의 운행여건에 악영향 또는 전체적으로 자율주행차가 장점을 발휘하게 어려운 환경을 조성
 - 따라서 전용차로를 설치하여도 도심에서의 좌·우회전 등을 위한 전용차로 진입과 진출이 필수이므로 큰 효과가 없는 것으로 나타남

2. 연구의 한계

- 고양창릉 지구를 모델링하면서 마이크로(미시적) 모델링에서 요구하는 정밀한 차량 흐름을 모사하는데 한계가 존재
 - 교통영향평가의 매크로(거시적) 모델링에서 도출한 추정 O/D를 바탕으로 마이크로(미시적) 모델링을 수행하여 전반적으로 교차로에서의 통행 상태가 양호하지 못함
 - 실제 운행 자료가 없으므로 확인 절차를 수행하기 곤란
 - 교통영향평가 자료를 적용하였으나, 교차로에서의 신호 최적화 등이 충분하지 못함
- 자율주행차의 행동 특성을 모사하는 다양한 모형을 검토하지 못함
 - 자율주행차의 도로상의 행동을 규정하기 위한 다양한 모형이 존재
 - 본 연구에서는 IDM을 채택하였으나, 다수의 연구는 Wiedemann 99를 선택하였으며, CACC 모형 등이 있음
 - 이는 도심 도로라는 특성과 자율주행차가 보다 개선된 행동 특성을 보일 것이라는 전제로 선택함
 - 여러 가능한 모형을 다양하게 테스트하고 국내의 주행환경을 반영하여 최적의 모형을 선택하지는 못함
 - 따라서 다른 모형을 사용하면 결과의 차이가 있을 수 있는 여지가 높음
- 대상지의 교차로가 대체로 정체가 극심한 지역으로 자율주행차의 효과를 판단하기에는 교통량이 과다한 경향이 있음
 - 특정 기능의 성능을 비교평가하려면 적정 수준의 input이 효과적임
 - 과도한 input은 다른 요인에 의해 특징을 상쇄해버리는 효과가 있음
 - 본 연구의 모델링에서도 도심지 도로, 빈번한 교차로, 다양한 차로 구성과 변화로 인해 자율주행차의 성능이 아닌 다른 외생변수에 의한 영향이 큰 것으로 판단됨
- 초기 연구 제안의 목표를 달성하지 못함
 - 초기 연구수행계획서에서는 고양창릉 전체에 대한 문제점에 대한 개선과 적용, 효과를 도출하는 것이 또하는 큰 과제였음
 - 그러나 자원과 시간의 한계로 전용차로에 대한 부분으로 한정하여 연구를 수행함
 - 고양창릉 전체에 대해서 검토하기에는 모델 최적화와 상세 O/D도출 등에서 곤란을 겪음
 - 이는 연구 범위를 과다하게 설정한 문제이며, 초기 목표를 충실하게 달성하지 못함

- 전용차로 설치 시나리오의 결과를 반영한 개선 시나리오 작성과 효과도출이 충분하지 못함
 - 전용차로 설치 시나리오 모델링 결과를 반영하여 개선 시나리오를 작성하여 효과를 분석하였음
 - 그러나 모델링 상으로 가장 큰 문제였던 지하차로 출입구와 앞 교차로 간에서 발생하는 자율주행차와 일반차 간의 상충 문제를 해결하기 위해 지하차도 지상화를 개선안으로 제시하였으나, 결과적으로 효과가 없었음
 - 이는 더 큰 문제 요인이 있음을 내포하고 있으나, 구체적인 문제를 찾지 못했고, 해결 방안을 제시하지 못함
 - 따라서 의미있는 개선 안을 제시하는데 실패함
- 전반적으로 연구의 범위 설정에서 보다 세밀한 검토와 결정이 필요함
 - 1,2차 연구를 통해 과제의 원래 목표를 달성하는 것에 어려움을 겪음
 - 이는 처음부터 연구의 범위가 제한된 시간과 모델링 분야를 위탁해야 하는 여건을 고려할 때 과도한 경향이 있기 때문임
 - 따라서 적정 연구 범위를 설정할 필요가 있음

3. 향후 연구 제언

- 본 연구는 3년간의 연속 과제로 설계됨
 - 따라서 원래 목표대로 2024년의 3차년도 연구는 가로변 설계 방향(Flex Zone 설계 운영)에 대한 연구를 수행 필요
 - 그러나 1, 2차 연구의 수행 결과를 바탕으로 다음의 추가적인 연구가 필요
- 자율주행차 확산에 대한 추가적인 전망
- 자율주행차 도입과 확산이 이전 전망에 비해 지체하고 있음
 - 1차년도 연구에서 큰 틀에서 국내의 상용화 전망을 수행하였음
 - 그러나 2022년말과 2023년 초를 기점으로 급격히 변화하는 여건을 반영하여 수정 필요
 - 그리고 자율주행차에 대한 무게가 버스, 셔틀, DRT 등 대중교통으로 이동하고 있는 것을 고려하여 이들 수단에 대한 보다 상세한 전망이 필요

■ 자율주행차 운행 시 도로 네트워크의 문제점 개선 방안

- 이번 연구에서 완성하지 못한 부분으로 도로 네트워크의 문제 구간에 대한 개선 방안에 대한 추가적인 연구가 필요
- 도심 도로의 복잡성으로 인해 문제점의 원인 파악과 개선 방안 도출이 쉽지 않음
- 따라서 이 분야에 대한 지속적이고 반복적인 연구가 필요

■ 도로의 차로 구성과 따른 자율주행차의 추종모형에 따른 변화 기초연구

- 자율주행차에 대한 연구는 모델링을 기반으로 수행됨
- 모델링은 선택하는 차량 행동을 모사하는 모형의 선택에 따라 다른 결과를 제시할 수 있음
- 따라서 다양한 차량 모형의 차이점을 명확히 인식하고, 상황에 따른 적합한 모형을 선택하기 위해 기초 연구가 필요
- 그리고 2차로, 3차로 등 도심의 다양한 차로와 교차로 간 간격, 교통량의 단계적 변화 등 다양한 요인에 따른 차이를 연구할 필요가 있음

■ 1기, 2기 신도시 등 현재 실현된 신도시의 데이터를 활용한 연구

- 연구의 초기 목적이 3기 신도시와 미래 신도시를 위한 연구였으며, 이로 인해 아직 현실화 되지 않은 3기 신도시의 교통영향평가 자료를 바탕으로 연구를 수행함
- 보다 현실적이고 구체적인 결과를 도출하기 위해 1기, 2기 신도시의 교통흐름 자료를 수집하고 이를 반영하여 모델을 보다 현실적으로 Calibration 및 Validation 하여 연구를 수행할 필요가 있음

참고문헌 Reference

[국내문헌]

- 국토교통부(2020), 「고양창릉 공공주택지구 광역교통개선대책」, p.327.
- 국토교통부(2022), 「미래를 향한 멈추지 않는 혁신 모빌리티 혁신 로드맵」, 국토교통부.
- 김범일(2021), 「고속도로 자율주행자동차 전용차로 기준설정에 관한 연구」, 서울대학교 대학원 환경계획학과 박사학위논문.
- 김수희 외(2022), 「자율주행 전용차로 도입 타당성 분석 방법론 연구」, 한국도로공사 도로교통연구원, 2023년 자율주행 공청회 발표자료, 2023.11.07.
- 김영재·홍장익(2021), “가변성을 고려하는 VENTOS 기반 군집 자율주행 시뮬레이션: 「한국정보처리학회 논문지」, 10(2), pp. 45-56.
- 김종호·임동현·서영훈·김형주(2021), “자율주행 전용차로 도입에 따른 고속도로 교통류 영향”, 「대한교통학회 제84회 학술발표회 논문」, pp. 219-220.
- 김형준·백성채·윤덕근·박제진(2022), “고속도로 자율주행 전용차로 도입 시 혼합교통류 특성 분석 시나리오 개발 연구”, 「대한교통학회학술지」, 39(6), pp. 838-848.
- 박인선·이종덕·이재용·황기연(2015), “자율주행차량 도입에 따른 고속도로 교통류 영향분석 - 정부고속도로 서울-신갈 기본구간을 중심으로”, 「한국ITS학회논문지」, 14(6), pp. 21-36.
- 박지원·장지용·오철(2018), “ACC 장착 차량 운전자의 시스템 개입특성 및 주행안전성 분석”, 「대한교통학회지」, 36(6), pp. 480-492.
- 백성채·신예은·박제진(2022), “고속도로 자율주행 전용차로 설치 시 교통류 개선 효과평가”, 「한국ITS학회 2022년 추계학술대회 논문」, pp.604-605.
- 백성채·신예은·유한솔·박제진(2023), “고속도로 엇갈림구간 자율주행 전용차로 교통류 개선 효과평가”, 「연구한국ITS학회 추계학술대회 논문」, pp. 481-482.
- 백주호(2023), 「교통 시뮬레이션을 활용한 자율주행 단계에 따른 도로 네트워크 성능 변화 분석」, 한밭대학교 석사학위논문.
- 신도겸·김태균·변완화·권오준 (2023), 「자율주행시스템을 고려한 신도시 도로 네트워크 구축방안(I)」, 연구기획 2023-011, 토지주택연구원.

유화평·홍다희·박민주·탁세현·이주희·여화수(2018), “자율주행 차량 전용차로 도입의 시뮬레이션 기반 효과분석”, 「한국ITS학회 춘계학술대회 논문」, pp.273-278.
한국토지주택공사(2021), 「고양창릉 공공주택 교통영향평가」, (주)한국종합기술.

[국외문헌]

- Karbasi, A. H., Mehrabani, B. B., Cools, M., Sgambi, L., and Saffarzadeh, M.(2022), “Comparison of Speed-Density Models in the Age of Connected and Automated Vehicles”, *Journal of Transportation Research Board*.
- Olstam, J. J. and Tapani, A. (2004), *Comparison of Car-following models*, Swedish National Road and Transport Research Institute, pp.13-24.
- Pereira, J. L. F.(2011), An Integrated Architecture for Autonomous Vehicles Simulation, FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO, Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores Polytechnic State University: San Luis Obispo, CA, USA.
- Sadid, H. and Antoniou, C.(2023), “Modelling and simulation of (Connected) autonomous vehicles longitudinal driving behavior: A state-of-art”, *IET Intelligent Transport Systems*, 17, pp.1051-1071.
- Talebpour, A, Mahmassani, H.S., and Elfar, A.(2017), “Investigating the Effects of Reserved Lanes for Autonomous Vehicles on Congestion and Travel Time Reliability”, *Journal of the Transportation Research Board*.
- Wang, Z. Shi, Y., Tong, W., Gu, Z., and Cheng, Q.(2023), “Car-Following Models for Human-Driven Vehicles and Autonomous Vehicles: A Systematic Review”, *Journal of Transport Engineering Part A: Systems*, 149(8): 04023075.
- Zhong, Z., Lee, J., and Zhao, L.(2017) “Evaluations of Managed Lane Strategies for Arterial Deployment of Cooperative Adaptive Cruise Control”, *Journal of the Transportation Research Board*.

[온라인 자료]

- 곽노필(2022.04.01.), “자율주행차 돌파구, 결국 전용차로에서 찾는다”, 한겨레신문.
<https://www.hani.co.kr/arti/science/future/1036771.html>
- 이상석(2023.03.31.), “일본, 세계 최초 고속도로에 ‘자율주행 전용차로’ 도입”, 오피니언

뉴스. <https://www.opinionnews.co.kr/news/articleView.html?idxno=82612>
 일본경제신문, <https://www.nikkei.com>; <https://robotstart.info/>, 2023.11.26. 읽음
 카카오맵, 2023. 10. 27. 읽음
 토지주택공사(LH) 공간정보 시스템 2024. 02. 19. 읽음.
 CAVUE 홈페이지, 2023.11.26. 읽음 <https://www.cavnue.com>
 TNW (2022), “Dedicated lanes for autonomous vehicles are coming — so get prepared”, 2023.11.26. 읽음.
<https://thenextweb.com/news/the-challenge-to-create-autonomous-vehicle-corridors-for-mass-adoption>
 唐俊T(2021.05.14.) “雄安三条高速5月底通车，京雄高速设置自动驾驶专用道”，界面新闻.
<https://www.jiemian.com/article/6093929.html>
 近藤彰俊(2023.3.31), “新東名に自動運転レーン、対象やレベルは”, 日本経済新聞
 神崎洋治(2019.6.11), “新東名高速でソフトバンクがトラック隊列走行の5G実証実験
 「5G-NR」で車間距離の自動制御に成功【世界初】”, ロボスタ