19CTAP-C151958-01

자율협력주행을 위한 V2X 통신 네트워크의 혼잡제어 기술 및 통합 성능 평가 시뮬레이션 플랫폼 개발 최종보고서

2021

국토교통과학기술진흥원

국토교통부

보안 과제( ), 일반 과제(○) / 공개(○), 비공개( )발간등록번호()

국토교통기술촉진연구사업 제2차 연도 최종보고서

R&D / 19CTAP-C151968-01

자율협력주행을 위한 V2X 통신 네트워크의 혼잡 제어 기술 및 통합 성능 평가 시뮬레이션 플랫폼 개발 최종보고서

2021. 02. 10.

주관연구기관 / 한국교통대학교 산학협력단
공동연구기관 / 연세대학교 산학협력단
공동연구기관 / 한밭대학교 산학협력단

국 토 교 통 부

국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

'자율협력주행을 위한 V2X 통신 네트웍의 혼잡 제어 기술 및 통합 성능 평가 시뮬레이션 플랫폼 개발'(연구개발 기간 : 2019. 04. 15. ~ 2020. 12. 31) 과제의 최종보고서 9부를 제출합니다.

2021. 02. 10.

주관연구기관명 : 한국교통대학교 산학협력단 (대표자) 전문슈 (인)

공동연구기관명 : 연세대학교 산학협력단 (대표자) 이승용 (인)

공동연구기관명 : 한밭대학교 산학협력단 (대표자) 최종인 (인)

주관연구기관책임자: 문 철

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	19CTAP-C151968-01	해당 단계 연구 기간	2019-04-15 ~ 2020-12-31	단계구분	1/1
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	기초 원천			
연구과제명	대과제명				
	세부과제명	자율협력주행을 위한 V2X 통신 네트웍의 혼잡 제어 기술 및 통합 성능 평가 시뮬레이션 플랫폼 개발			
연구책임자		해당단계 참여연구원 수	총: 16 명 내부: 명 외부: 명	해당단계 연구비	정부: 370,000 천원 민간: 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계: 370,000 천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 16 명 내부: 명 외부: 명	총 연구비	정부: 370,000 천원 민간: 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계: 370,000 천원
연구기관명 및 소속 부서명	주관연구기관: 한국교통대학교 산학협력단 공동연구기관: 연세대학교 산학협력단 공동연구기관: 한밭대학교 산학협력단			참여기업명	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:	

※ 국내・외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 갈음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	일반과제

9대 성과 등록・기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설・장비	기술요약 정보	소프트웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
등록・기탁번호	9	5				5					

국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설・장비 현황

구입기관	연구시설・장비명	규격 (모델명)	수량	구입연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	NTIS 등록번호

요약(연구개발성과를 중심으로 개조식으로 작성하되, 500자 이내로 작성합니다)	보고서 면수 184

요약문

연구의 목적 및 내용	○ 자율협력주행을 위한 V2X 통신 네트웍의 분산혼잡제어 기술을 개발하고, 도심 혼잡 교통환경에서 자율협력주행 시나리오에 기반하여 성능을 분석하고 평가 자율협력주행을 위한 V2X 통신 네트웍의 분산혼잡제어 기술 개발 - 도심 혼잡 교통환경에서 자율협력주행 시나리오 기반 Microscopic Traffic 시뮬레이터 개발 - V2X(WAVE, 3GPP C-V2X)의 무선채널, 물리(PHY) 계층, 그리고 MAC 계층이 결합된 다계층(cross-layer) 시뮬레이터 개발 - Traffic 시뮬레이터와 V2X 다계층 시뮬레이터 연동 API 개발 - 자율협력주행 시나리오 기반 V2X 네트웍 분산혼잡제어 성능 평가
연구개발성과	○ 자율협력주행을 위한 V2X 통신 네트웍의 분산혼잡제어 기술 개발 - 3GPP C-V2X(Rel.14)와 eV2X(Rel.15) Mode 4(V2V 통신)에서 Sensing-based Semi-Persistent Scheduling (SPS) 기반의 V2X 네트웍 분산혼잡제어 기술 - 차량 밀도 및 이동속도, 그리고 교통환경에 따라 최적으로 메시지 전송 주기와 전송 전력 등을 조절하는 적응적 V2X 네트웍 분산혼잡제어 기술 - 협력자율주행 서비스에 따른 최적화를 수행하는 적응적 V2X 네트웍 분산혼잡제어 기술 ○ C-V2X Cross-layer (PHY/MAC) 시뮬레이터 - 교심 교차로 무선채널 모델 및 C-V2X와 eV2X의 물리계층 시뮬레이터(S/W) - C-V2X와 eV2X의 MAC계층 Sensing-based Semi- Persistent Scheduling (SPS) 시뮬레이터(S/W) - C-V2X와 eV2X의 PHY 계층과 MAC계층 통합 cross- layer 시뮬레이터(S/W) ○ 자율협력주행 통합 시뮬레이션 플랫폼 - 도심 혼잡 교통환경에서 자율협력주행 시나리오 기반 Microscopic Traffic 시뮬레이터(S/W) - 협력자율주행 서비스별 V2V 메시지 - 협력자율주행 트래픽시뮬레이터와 Cross-layer(PHY/MAC) 시뮬레이터 연동 API (S/W)
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	○ 활용방안 - 확보할 혼잡 제어 기술은 V2X 통신 기술로서 많은 관련 후속 연구를 촉진 시킬 수 있으므로, 해당 분야에 대한 연구 주도권을 확보할 수 있음. - 개발될 V2X 네트웍 분산혼잡제어 기술을 C-V2X 표준화 회의에 제안하여 C-V2X 표준화에서 표준 기술로서 채택될 경우, 지적 재산권에 의한 로열티 수입 및 외국 로열티 공세에 효과적으로 대항할 수 있을 것으로 사료. - 개발된 연구 결과물의 실현 및 실용화 가능성을 산업체 및 연구소와 공동으로 리뷰하고 검증하는 과정을 통해, 산업체 및 연구소에 의해 검증된 기술을 공통 특허 출원을 통해 기술 이전 추진 가능함. - 본 과제의 수행 결과물인 V2X 통합 시뮬레이터는 향후 5G-V2X 표준화 됬을시, 관련 기술들의 성능 검증을 위해 활용될 수 있음 ○ 기대 효과 - V2X 통신 기반의 혼잡 제어 기술을 제안하여 셀룰러 이동통신 기술을 활용한 자율협력주행 서비스를 구현하는데 기여 - 셀룰러 무선네트워크를 기반으로 하는 자율주행서비스 시스템에서 요구되는 기술적 문제들을 해결 - 개발된 혼잡 제어 기술을 관련 산업체와의 산학협력 연구를 통해 산업체로의 기술 이전하고 제품화를 통한 수익 창출 가능 - 혁신적인 혼잡 제어 기술을 개발하고 이의 성능 및 실효성을 검증할 경우, 자율협력서비스 실현에 있어 선도적인 기술 확보로 시장의 주도적 위치 선정 가능

국문핵심어 (5개 이내)	자율협력주행	차량 통신	분산혼잡제어	성능평가플랫폼	시뮬레이션플랫폼
영문핵심어 (5개 이내)	Autonomous cooperative drving	V2X	Distributed Congestion Control	Evaluation Platform	Simulaton Platform

〈 목 차 〉

1. 연구개발 과제의 개요 ····· 5

가. 연구개발의 개요 ····· 5

나. 연구개발 대상의 국내외 현황 ····· 8

다. 연구개발의 필요성 ····· 13

라. 연구개발의 목표 및 내용 ····· 16

2. 연구수행내용 및 성과 ····· 24

가. 연구개발의 추진전략·방법 및 추진체계 ····· 24

나. 연구 내용 ····· 29

다. 연구개발 성과 ····· 168

3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도 ····· 172

가. 목표 ····· 172

나. 목표 달성여부 ····· 173

4. 연구개발성과의 활용 계획 ····· 181

가. 연구개발성과의 활용방안 ····· 181

나. 기대효과 ····· 181

붙임. 참고 문헌 ····· 183

1. 연구개발 과제의 개요

가. 연구개발의 개요

(1) 연구개발 목표

- 본 연구에서는 3GPP LTE 기반의 4G C-V2X(Rel.14)와 5G eV2X(Rel.15)의 차량간 통신(V2V)과 차량과 RSU(Road Side Unit)간 통신(V2R/R2V)을 수행하는 Mode 4에서, 도심의 다양한 운행 환경 및 차량 밀도 그리고 협력자율주행 서비스에 따라 메시지 전송주기 및 송신전력 등을 적응적으로 최적화하는 V2X 네트웍 분산혼잡제어 기술을 개발함.
- 또한, 개발된 V2X 네트웍 분산혼잡제어 기술의 성능을 자율협력주행 시나리오 기반 트래픽 시뮬레이터와 C-V2X/eV2X의 PHY/MAC cross-layer 시뮬레이터가 연동된 자율협력주행 통합 시뮬레이션 플랫폼을 통해 분석하고 검증을 수행함.

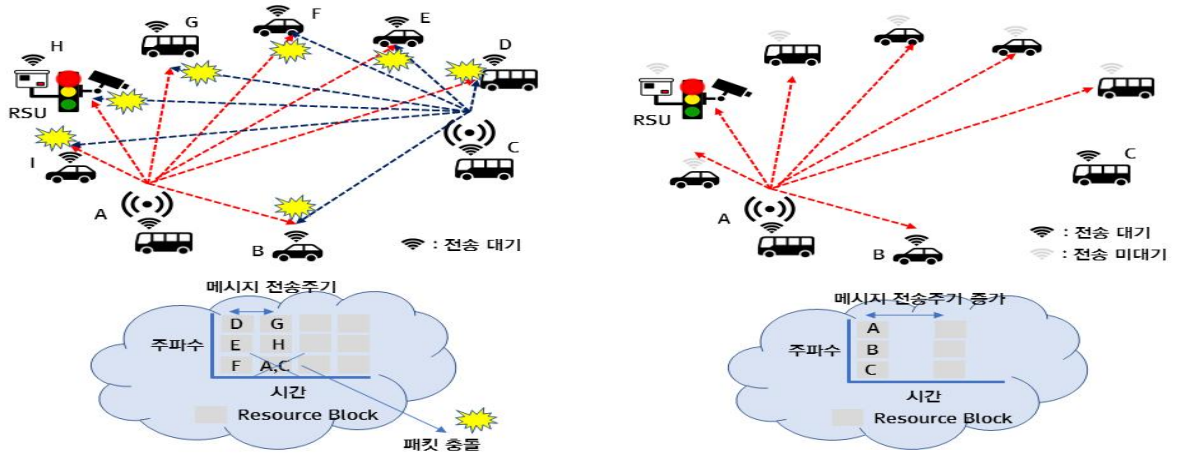
(2) 연구개발 내용

연구 성과물	연구개발 내용
자율협력주행을 위한 V2X 네트웍 분산혼잡제어 기술	• 자율협력주행을 위한 V2X 네트웍의 분산혼잡제어 원천기술 개발 - 3GPP 4G C-V2X(Rel.14)와 5G eV2X(Rel.15) Mode 4(V2V 통신)에서 Sensing-based Semi-Persistent Scheduling (SPS) 기반의 V2X 네트웍 분산혼잡제어 기술 개발 - 차량 밀도 및 이동속도, 그리고 교통환경에 따라 최적으로 메시지 전송 주기와 전송 전력 등을 조절하는 적응적 V2X 네트웍 분산혼잡제어 기술 개발 - 협력자율주행 서비스(협력 센싱, 협력 머뉴버링, 플래투닝)에 따른 최적화를 수행하는 적응적 V2X 네트웍 분산혼잡제어 기술 개발
C-V2X Cross-layer (PHY/MAC) 시뮬레이터	• C-V2X의 무선채널, 물리(PHY) 계층, 그리고 MAC 계층이 결합된 다계층(cross-layer) 시뮬레이터 개발 및 성능평가 - 도심 교차로 무선채널 모델 및 C-V2X와 eV2X의 물리계층 시뮬레이터 개발 - C-V2X와 eV2X의 MAC계층 Sensing-based Semi- Persistent Scheduling (SPS) 시뮬레이터 개발 - C-V2X와 eV2X의 PHY 계층과 MAC계층 통합 cross- layer 시뮬레이터 개발 - 개발된 V2X 네트웍 분산혼잡제어 기술을 구현하고, 혼잡제어 파라메터에 대한 시뮬레이션을 통해 최적 파라메터 도출
자율협력주행 통합 시뮬레이션 플랫폼	• 도심 혼잡 교통환경에서 자율협력주행 시나리오 기반 Microscopic Traffic 시뮬레이터 개발 - 협력 센싱, 협력 머뉴버링, 플래투닝의 협력자율주행 서비스별 평가 시나리오 도출 - 협력자율주행 서비스별 V2V 메시지 개발 및 검증 - Prescan 기반 협력자율주행 시나리오 수행 트래픽 시뮬레이터 개발 • 협력자율주행 트래픽시뮬레이터와 Cross-layer(PHY/MAC) 시뮬레이터 연동 API 개발 - Matlab simulink 기반 C-V2X와 eV2X의 PHY 계층과 MAC계층 통합 cross-layer 시뮬레이터 구현 - Prescan 협력자율주행 시뮬레이터와 cross-layer 시뮬레이터간 연동 위한 API 구현 및 통합 • 교통환경 및 자율협력주행 시나리오 기반 V2X 네트웍 분산혼잡제어 성능 평가 - 다양한 도심환경에서 협력자율주행 시나리오 별로 V2X 분산혼잡제어 기술에 의한 협력자율주행 성능 통합 분석

(3) 연구개발 개념

○ 3GPP C-V2X 네트워 분산혼잡제어 기술의 개념

- 협력자율주행 지원을 위해 C-V2X는 협력자율주행의 협력 머뉴버링과 협력 센싱을 위한 차량간 V2V 통신과 차량과 RSU간 V2R/R2V 통신에서 사용되는 메시지 전송에서 요구 지연 시간과 패킷 전송률을 만족시키는 것이 필수적임.
- 이를 위해서, 메시지 전송을 위한 무선통신 자원을 효과적으로 할당하는 것이 매우 중요하며, C-V2X/eV2X에서는 기지국에서 중앙 집중식 스케줄링으로 자원을 할당하는 mode 3와 차량간/차량과 RSU간에 예약 및 경쟁방식 기반 분산 스케줄링으로 자원을 배분하는 mode 4가 제안되어 있음.
- Mode 4에서 C-V2X와 eV2X 모두 차량의 밀도가 증가할 경우, 예약 및 경쟁방식 기반 분산 스케줄링에서 발생하는 자원 중복 할당에 의한 패킷 충돌에 의해, 패킷 전송률이 감소하고 지연 시간이 증가하게됨.
- 이를 해결하기 위해 현재 C-V2X/eV2X Mode 4 표준에서는 차량 밀도 증가에 의한 혼잡을 제어할 수 있도록 분산혼잡제어(Decentralized Congestion Control, DCC) 알고리즘을 지원할 수 있도록 체계를 구성 하였지만, 구체적으로 운용할 분산혼잡제어 알고리즘과 파라메터들에 대해 명시하지 않고 있음. 이는 분산혼잡제어를 운용하는 환경이나 서비스 종류에 따라 사용되는 분산혼잡제어 알고리즘과 parameter 최적화가 서로 달라지기 때문에, V2X 네트웍을 운용하는 주체가 운용환경과 목표 서비스에 적합한 분산혼잡제어 알고리즘과 parameter 최적화를 수행해야 하기 때문임.
- **본 연구에서는 도심의 다양한 운행 환경 및 차량 밀도에 따라 적응적으로 메시지 전송주기 및 송신전력 등을 최적화하는 V2X 네트웍 분산혼잡제어 기술을 개발함.**
  - ✓ 그림 ①에서 차량 밀도 증가에 의해 패킷 충돌이 발생할 경우, 각 차량은 차량 밀도 증가를 감지함. 이후 그림 ②와 같이 각 차량들의 메시지 전송 주기를 증가시키고, 그에 따라 초당 전송해야할 메시지 수가 감소되어, 동시에 메시지를 전송하기 위해 경쟁하는 차량의 수가 감소함에 따라 패킷 충돌 확률을 감소시킴.
  - ✓ 전송 주기 뿐 아니라 메시지 송신전력을 조절하여 메시지를 전달하는 범위를 조절하여 혼잡을 제어할 수 있음.
- **또한, 협력자율주행 서비스(협력 센싱, 협력 머뉴버링)에 따른 서로 다른 성능 요구사항을 만족할 수 있도록 최적화를 수행하는 적응적 V2X 네트웍 분산혼잡제어 기술을 개발함.**



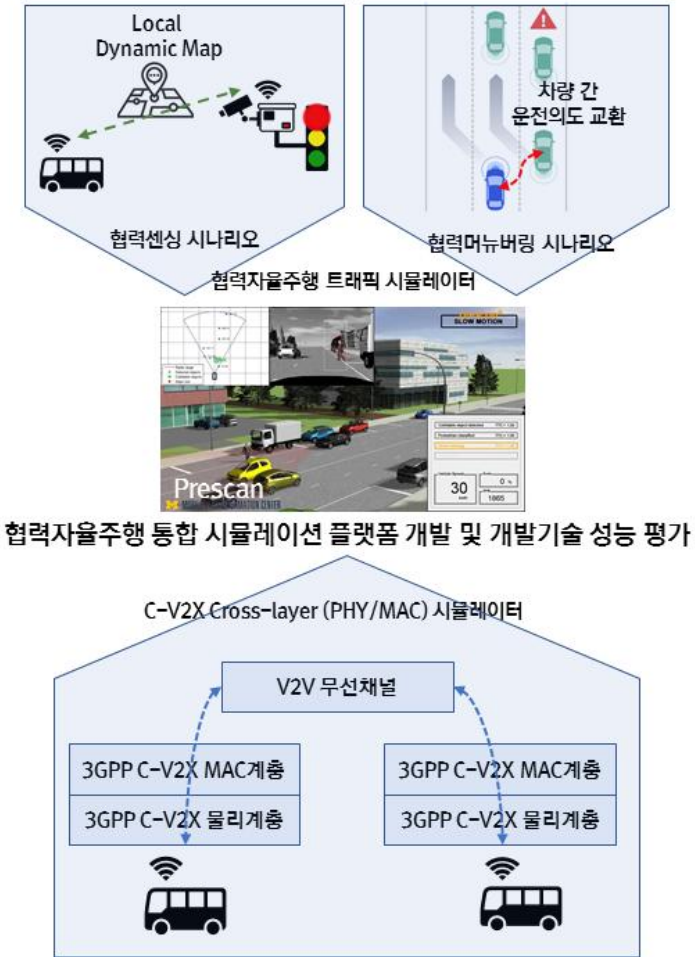
① 도심에서 차량밀도 증가에 의한 패킷 충돌에 의한 패킷 손실 발생

② 차량의 메시지 전송 주기 증가시켜, 메시지 전송 대기 차량 수 감소에 의한 패킷 충돌 감소

[도심의 운행 환경 및 차량 밀도에 따라 메시지 전송주기 및 송신전력 등을 적응적으로 최적화하는 3GPP C-V2X 네트웍 분산혼잡제어 기술의 개념]

○ **자율협력주행 통합 시뮬레이션 플랫폼의 개념**

- 협력자율주행서비스의 성능은 V2X 물리계층과 MAC계층, 그리고 협력자율주행 서비스 계층에서 다음의 영향을 모두 받으므로, 모든 계층의 성능을 통합하여 분석해야 함.
  - ✓ C-V2X/eV2X 물리계층에서의 Packet error rate(PER) 성능
  - ✓ MAC 계층에서의 Sensing-based Semi-Persistent Scheduling과 분산혼잡제어에 의한 패킷 전송율 과 전송 지연
  - ✓ 협력자율주행 서비스(협력센싱, 협력머뉴버링, 플래투닝 등)별 특성과 알고리즘
- 따라서, V2X 물리계층과 MAC계층, 그리고 협력자율주행 서비스 계층의 성능을 통합적으로 분석할 수 있는 시뮬레이션 플랫폼 다음과 같이 개발함.
  - ✓ 도심 혼잡 교통환경에서 자율협력주행 시나리오 기반 Microscopic Traffic 시뮬레이터 개발
    - 협력 센싱, 협력 머뉴버링, 플래투닝의 협력자율주행 서비스별 평가 시나리오 도출
    - Prescan 기반 협력자율주행 시나리오 수행 트래픽 시뮬레이터 개발
  - ✓ 협력자율주행 트래픽시뮬레이터와 Cross-layer(PHY/MAC) 시뮬레이터 연동 API 개발
    - Prescan 협력자율주행 시뮬레이터와 cross-layer 시뮬레이터간 연동 위한 API 구현 및 통합
  - ✓ 다양한 도심환경에서 협력자율주행 시나리오 별로 V2X 분산혼잡제어 기술에 의한 협력자율주행 성능 통합 분석



[자율협력주행 통합 시뮬레이션 플랫폼을 통한 분산혼잡제어 기술 성능 분석 및 검증]

나. 연구개발 대상의 국내·외 현황

(1) 관련 분야의 국내외 연구동향 및 학술적 성과

○ 국가 연구개발사업 유사연구 실적

- www.kaia.re.kr 과 www.ntis.go.kr 에서 검색된 본 과제와 유사한 과제는 다음과 같음.

(단위 : 억원)

부처명	사업명	과제명	예산	비 고
교육과학 기술부	기본연구 지원사업	무선 이동 통신을 위한 간섭 관리 기법 및 혼잡 제어에 관한 연구	0.59	종료
미래창조 과학부	중견연구자 지원사업	VANTEs의 혼잡제어를 위한 핵심기술 및 검증 테스트베드 연구	2.00	종료
교육과학 기술부	기본연구 지원사업	차량 통신망에서 차량 환경 인지 cross layer 전송 제어 기술 연구	0.59	종료

- “무선 이동 통신을 위한 간섭 관리 기법 및 혼잡 제어에 관한 연구” 과제
  - ✓ 해당 과제는 무선이동 네트워크를 위한 간섭 관리 기술과 분산 혼잡 제어 기술 개발을 목적으로 하고 있음.
  - ✓ 해당 과제는 혼잡 기술에 관한 연구에 대하여 VANET(Vehicular Ad Hoc Network) 환경을 모델링하고 분산 네트워크 밀도 추정 알고리즘의 연구를 진행함.
  - ✓ 해당 연구는 네트웍의 flooding 방식의 broadcast storm 문제를 해결하기 위한 기술개발로 그 범위가 네트웍으로 제한되어 있으며 알고리즘 개발에 있어서 자율협력주행 운용 환경, V2X 통신에 대한 무선 채널 특성, 물리계층에서의 Packet error rate(PER), MAC 계층의 특성과 이에 의한 VANET(Vehicle Ad-hoc Network)의 packet 전송율 및 지연 등은 고려하고 있지 않음.
- “VANETs의 혼잡 제어를 위한 핵심기술 및 검증 테스트베드 연구” 과제
  - ✓ 해당 과제에서는 비컨 메시지를 브로드캐스트하면서 발생하는 네트웍 혼잡으로 인한 딜레이 및 패킷 로스를 해소하기 위한 혼잡 제어 기술을 연구함.
  - ✓ 해당 과제에서는 다양한 통신 파라메터(power, data rate, message rate, etc)를 반영한 통합 혼잡 제어 프레임 워크를 개발하고 성능 검증을 위한 시뮬레이터를 개발함.
  - ✓ 해당 과제에서는 WAVE 시스템에서 MAC과 물리 계층의 단순 파라메터 변화에 따른 성능 분석 및 제안이 이루어졌으며 물리계층에서의 PER 성능에 영향을 미치는 채널 추정 기술, 무선 채널 특성 등이 완전히 고려되지 않음.
- “차량 통신망에서 차량 환경 인지 cross layer 전송 제어 기술 연구” 과제
  - ✓ 해당 과제에서는 혼잡 예측 알고리즘을 제안하여 차량 밀도 증가 시 처리율 및 지연 성능을 향상시키는 연구를 진행함.
  - ✓ 해당 과제에서는 다중 경로 전송 제어 알고리즘의 연구와 IEEE 802.11p MAC 계층의 채널 혼잡을 감소시키기 위한 MAC 알고리즘에 대한 연구를 통해 cross-layer 다중 경로 전송 제어 기술을 개발함.
  - ✓ 해당 과제는 차량통신망에서의 멀티미디어 정보 서비스 및 P2P sharing 서비스 제공 연구에 국한되어 있어 다양한 자율협력주행 시나리오를 반영하지 못함.

위의 검색된 세 개의 유사 과제들은 분산 혼잡 제어 기술 개발에 있어 각 계층의 개별적인 성능만을 고려하고 있으며 자율협력주행 시나리오를 충분히 반영하지 못함. 따라서, 본 연구에서 제안하는 자율협력주행 운행 환경, 무선채널, 물리, MAC 계층을 통합하여 이를 고려한 분산 혼잡 제어 기술 개발에 대한 연구는 수행된 적 없음.

○ 연구개발과제의 차별화 방안

- 과거 VANET의 혼잡 제어 기술 개발이 진행되었지만 기술 개발 및 성능 평가에 있어 각 계층의 개별적인 성능만을 고려하고 있으며, 자율협력주행 시나리오를 충분히 반영하지 못함.
- 해당 과거 연구에서는 V2X 무선 채널 특성 상 V2X 물리계층, MAC 계층, 네트워크 및 어플리케이션 계층 등에서 현실적으로 발생할 수 있는 통신상의 지연, 오차 등을 고려하지 않음. 따라서, 혼잡 제어 기술의 현실적인 완성도 및 평과 결과 피드백을 근거한 기술개발이 어려움.
- 본 연구에서는 자율협력주행 차량들 간 동시 다발적으로 발생하는 통신을 (1) V2X 무선 채널 특성, (2) V2X 물리계층, (3) MAC 계층, (4) 네트워크 및 어플리케이션 계층 등에서 발생할 수 있는 통신 지연, 오차, (4) 메시지 표출방식 별 운전자 인지반응 시간 등을 반영하여 정확하고 현실적인 혼잡 제어 기술 개발 및 평가 피드백을 획득하고자 함. 획득된 정확하고 실제적인 평가 결과에 기반하여 V2X 혼잡 제어 기술 최적화가 가능함. 본 연구는 전 계층을 고려한 혼잡 제어 핵심 기술 및 객관적인 평가 시뮬레이션을 개발하는 과제로서 기존 과거 연구와 차별화 됨.
- 본 연구 과제를 통해 현재 자율협력주행 서비스의 문제점 및 한계점을 극복할 수 있는 혼잡 제어 기술 개발을 통해 자율협력주행 서비스 향상을 기대할 수 있음.
- 또한 자율협력주행 시나리오 기반 전 계층을 통합한 시뮬레이션 플랫폼을 구현함으로써 자율협력주행 서비스의 정확한 성능 평가 및 인증이 가능함.

○ 관련분야의 국내외 연구동향 및 학술적 흐름 분석

- 현재 자율주행차는 운전자 제어 하에 센서(카메라, 레이더, 라이다 등)를 통해 운전자의 안전 및 편의성을 강화시켜 주는 반자동화 단계에서 시스템이 운전조작의 모든 측면을 제어해 운전자 없이 주행할 수 있도록 하는 완전자율주행으로 범위가 확대되고 있음.
- 센서 기반의 자율주행은 먼 거리나 사각지대에서 발생하는 상황을 인지할 수 없는 한계가 존재하며, 이러한 센서의 한계를 극복하고 완전자율주행을 실현하기 위해서는 언제 어디서나 완벽한 무선 통신이 가능해야 하며 이를 위해 V2X 통신기술이 핵심기술로 평가받고 있음.
- 현재 V2X 통신을 지원하기 위한 기술로는 IEEE 802.11p 기반의 WAVE 및 3GPP 셀룰러 기반의 C-V2X가 존재하며, 자율협력주행에서 요구되는 성능을 보장하기 위한 V2X 통신의 기술 설계, 개발, 검증과 관련된 다양한 프로젝트를 국내 및 유럽, 미국, 일본 등 여러 국가에서 수행되고 있음.
- WAVE와 C-V2X는 차량의 밀도와 송수신 거리가 증가함에 따라 Packet Delivery Ratio (PDR) 및 지연이 증가하는 기술적 한계가 존재하며 이를 해결하기 위하여 채널의 혼잡상황을 파악하여 채널 혼잡 상태를 완화시키는 Decentralized Congestion Control (DCC) 기술에 대한 연구가 수행되고 있음.
- 국내에서는 VANET에서의 혼잡제어를 위한 핵심기술 및 검증 관련 연구가 수행된 바 있으나 알고리즘 개발에 있어서 교통 트래픽의 특성, 물리, MAC 등의 통합적인 성능 평가가 아닌 각 계층의 개별적인 성능만을 고려하고 있으며 자율협력주행 시나리오를 충분히 반영하지 못함.
- 국외에서는 Intel 및 Qualcomm 사에서 C-V2X 환경에서 혼잡 제어를 줄일 수 있는 가능한 매커니즘을 정의하고 매커니즘에 따른 성능 평가만을 수행하였으며 구체적인 DCC 동작 알고리즘에 대한 내용은 제시하지 않음.

(2) 국내외 관련 기술 특허 동향

○ 국내 특허 동향

- 검색대상은 등록 완료 및 공고대상인 특허에 대하여, “차량 통신”과 “혼잡 제어” 의 검색어를 사용하여 검색된 총 1,695 건을 대상으로 분석하였음.
- 국내의 V2X 기반 혼잡 제어 관련 특허 동향 분석 결과, 본 연구와 가장 관련성 있는 특허는 “차량 네트워크에서 혼잡 제어 장치 및 방법”이며, 상기 특허는 차량통신 기반의 혼잡 제어 시스템 및 방법에 대한 것임. 하지만, 구체적인 성능 평가에 대한 내용을 명시하고 있지 않으므로, 자율협력주행을 실현하기 위한 성능 요구조건을 충족하는지 알 수 없음. 객관적인 성능 평가가 필요함.

특허명	차량 네트워크에서 혼잡 제어 장치 및 방법
출원 정보	한국(KO) | 등록 | 출원인 : 한양대학교 산학협력단; | 출원번호 : 10-2012-0145482 (2012.12.13.) | 등록번호 : 10-1455-0840000 (2014.10.21.)
요약	차량 네트워크에서 혼잡 제어 장치 및 방법이 개시된다. 개시된 장치는, 혼잡 상황인지 여부를 판단하는 혼잡 판단부; 및 메시지 송신 주기인 타임 프레임을 미리 설정된 단위로 나눈 서브 프레임에 수신되는 리모트 차량으로부터의 메시지의 수를 예측하여 가용한 서브 프레임을 탐색하고 탐색된 서브 프레임 구간에서 메시지를 송신하는 메시지 송신 제어부를 포함한다. 개시된 장치 및 방법에 의하면, 차량 네트워크 혼잡 상태에서 운전자의 안전을 도모할 수 있으며, 프로세스 부하를 최소화하면서 효율적으로 메시지 송신을 제어할 수 있는 장점이 있다.

특허명	차량간 통신에서의 혼잡 제어 장치 및 방법
출원 정보	한국(KO) | 등록 | 출원인 : 현대모비스주식회사; | 출원번호 : 10-2012-0065045 (2012.06.18.) | 공개번호 : 10-2013-0141923 (2013.12.27) | 등록번호 : 10-1394-8840000 (2014.05.02.)
요약	본 발명은, 차량의 주행 정보를 주변 차량과 송수신하는데 이용되는 차량 통신 시스템 및 방법에 관한 것이다. 자차가 주변 차량과 주행 정보를 주고 받음으로써, 주변 차량의 위치, 속도, 운행 방향 등의 정보를 파악하여 사고 위험을 감소시킬 수 있는데, 주변 통신 상황에 따라 주행 정보의 송수신이 원활하게 이루어지지 않을 수 있다. 본 발명은 종래의 통신 시스템과 달리 주변 통신 상황에 기초하여 타임 프레임을 가변적으로 설정하고, 변경되는 타임 프레임에 기초하여 데이터를 전송하도록 함으로써, 주변 상황에 따라 차량 간의 데이터 송수신이 원활하게 되는 통신 혼잡 제어 장치 및 방법을 제공한다.

특허명	혼잡 제어 기능을 이용한 차량 통신 시스템 및 방법
출원 정보	한국(KO) | 등록 | 출원인 : 현대자동차주식회사; | 출원번호 : 10-2012-0144893 (2012.12.12.) | 공개번호 : 10-2014-0076412 (2014.06.20.) | 등록번호 : 10-1480-5930000 (2015.01.02.)
요약	본 발명은 차량 주변의 통신대상차량과의 통신 혼잡 상태에 따라 통신 성능을 제어하는 혼잡 제어 기능을 이용한 차량 통신 시스템 및 방법을 개시한다. 본 발명의 혼잡 제어 기능을 이용한 차량 통신 시스템은 차량 주변의 복수의 통신대상차량으로부터 식별정보를 포함하는 통신메시지를 전달받고 상기 통신메시지를 이용하여 복수의 통신대상차량별 패킷수신실패율을 분석하며 차량 주변의 통신 혼잡도를 산출하는 분석 모듈; 및 상기 혼잡도에 대응하는 기 설정된 데이터 전송속도 및 전송파워를 이용하여 상기 복수의 통신대상차량으로 데이터를 송신하도록 제어하는 제어 모듈을 포함한다.

○ 해외 특허 동향

- 검색대상은 등록 완료 및 공고 대상인 특허에 대하여, “Congestion Control”과 “V2X” 검색어를 조합하여 검색된 총 777 건을 대상으로 분석하였음.
- 해외 특허 동향 분석 결과 V2X 통신 중에 발생할 수 있는 채널 혼잡 상황에서 이를 해결할 수 있는 분산 혼잡 제어 시스템 및 방법론에 대한 특허들이 대다수임. 따라서, 본 연구과제의 연구 내용과는 다름.

특허명	CONGESTION CONTROL FOR LTE-V2V
출원 정보	미국(US) | 공개 | 출원인 : Qualcomm Incorporated; | 출원번호 : 15585635 (2017.05.03.) | 공개번호 : 20180048572 (2018.02.15.)
요약	Improvements may be made for the congestion control considering different technologies, types of radio resources, and priorities of different packets. The apparatus may be a UE. The UE determines an energy-based channel busy ratio (CBR) based on a number of probes on a set of radio resources having respective energy levels greater than an energy threshold. The UE performs congestion control based on the energy-based CBR by adjusting at least one transmission parameter of one or more transmission parameters or transmission power of the UE based on the energy-based CBR.

특허명	CONGESTION CONTROL FOR VEHICULAR-TO-ANYTHING SERVICES
출원 정보	미국(US) | 공개 | 출원인 : Intel Corporation; | 출원번호 : 15754531 (2016.04.01.)| 공개번호 : 20180242190 (2018.08.23.)
요약	Methods and apparatus for communicating in a wireless network supporting vehicle-to-anything (V2X) communication including a terminal comprising: transceiver circuitry to communicate via uplink and downlink radio interface with a radio access network of a wireless communication network and communicate directly via sidelink radio interface with one or more out of a vehicle terminal and/or a roadside unit; and control circuitry coupled to the transceiver circuitry to determine one or more indicator related to the apparatus and/or surrounding environment and control the transceiver circuitry to control communication over the sidelink radio interface based on the determined one or more indicator to control congestion on V2X spectrum resources.

(3) 국내외 시장분석 및 산업동향

- 전 세계적으로 자율주행차 개발이 활성화 되고 있으며, 부분 자동화 단계에서 완전 자동화 단계로 그 범위가 확대되고 있음. 완전자율주행을 실현하기 위해서는 언제 어디서나 저지연 고신뢰 차량 통신이 가능해야 하며, 이를 위해 V2X 통신기술이 필수적임.
- 현재 V2X 통신 기술로 IEEE 802.11p/WAVE 와 3GPP C-V2X이 존재하며, 협력자율주행에서 요구되는 성능을 보장하기 위한 V2X 통신의 기술 설계, 개발, 검증과 관련된 다양한 프로젝트를 국내 및 유럽, 미국, 일본 등 여러 국가에서 수행되고 있음.
- 본 연구의 최종 성과물인 V2X 네트웍 분산 혼잡 제어 기술은 자율협력주행을 실현하기 위한 핵심 기술 중에 하나인 V2X 통신에서 발생할 수 있는 PDR 및 지연 성능 감소에 대한 문제들을 획기적으로 해결할 수 있음. 따라서 확보할 혼잡 제어 기술은 V2X 통신 기술로서 많은 관련 후속 연구를 촉진 시킬 수 있으므로, 해당 분야에 대한 연구 주도권을 확보할 수 있음.

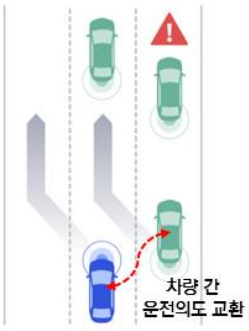
(4) 관련 분야의 국내외 표준화 동향

- V2X 통신은 협력자율주행을 지원하기 위한 핵심기술로 현재 IEEE 802.11p/WAVE와 3GPP Cellular V2X(C-V2X)의 표준화가 완성된 상태임.
- 협력자율주행을 지원하기 위해서는 V2X 통신이 매우 낮은 지연과 높은 신뢰도를 가지고 있어야 하며, 이를 위해 5G에서는 새로운 NR(New Radio) 기반의 C-V2X인 5G C-V2X에 대한 표준을 개발 중이며, 2019년까지 5G C-V2X 표준인 Release 16을 개발 완료할 예정임. 따라서, 5G C-V2X가 실제 환경에서 운용되는 것은 2025년 이후가 될 것으로 예상됨.
- 따라서, 자율주행 level 3가 상용화되고 5G C-V2X 도입되기 이전까지는 현재 개발되어 있는 WAVE와 C-V2X가 협력자율주행을 위한 V2X 통신으로 사용될 것임. 또한, 5G C-V2X 도입 이후에도 WAVE 및 C-V2X와 5G C-V2X가 상호 보완적으로 운용될 것임.

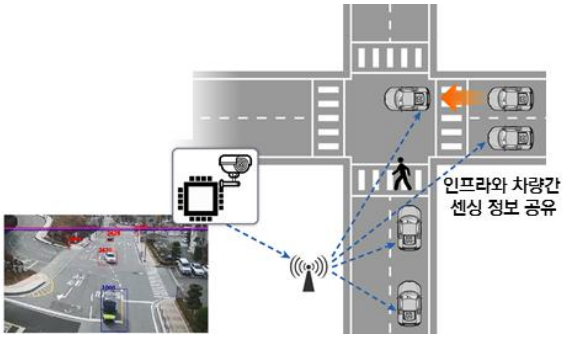
다. 연구개발의 필요성

○ **자율협력주행(cooperative autonomous driving) 기술 개발 현황**

- 자율주행 레벨 3(conditional automation) 이상으로 발전하기 위해서는 자동차 자체의 인식 및 제어 뿐 만 아니라 V2X 통신을 이용한 차량 간의 연결, 차량과 도로의 연결의 필요성이 대두됨.
- 또한, 자율주행차에 장착된 센서(카메라, 레이더, 라이다 등) 만으로는 먼 거리나 사각지대에서 발생하는 상황을 인지할 수 없는 한계가 존재함.
- 따라서, 이와 같은 한계를 극복하고 level 3 이상의 자율주행을 실현하기 위해서는, 차량과 인프라가 인식한 주변 상황을 V2X 통신을 통해 공유하여 차량이 센싱할 수 있는 범위를 확장시키는 협력 센싱(cooperative sensing)과 차량 간에 운전 의도를 V2X 통신을 통해 교환하는 협력 머뉴버링(cooperative maneuvering)에 기반한 자율주행 기술 개발이 요구되고 있음.



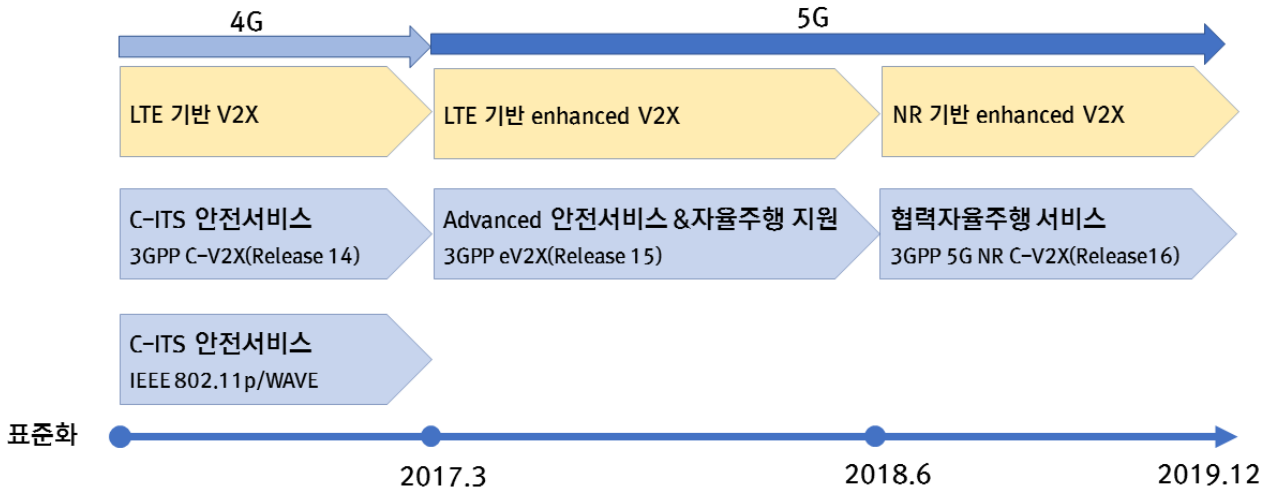
[협력 머뉴버링(cooperative maneuvering) 개념]



[협력 센싱(cooperative sensing) 개념]

○ V2X 통신 기술(IEEE 802.11p/WAVE, 3GPP C-V2X, eV2X, 5G NR C-V2X) 개발 현황

- Level 3 이상의 자율주행을 실현하기 위해서는 언제 어디서나 저지연 고신뢰 차량 통신이 가능해야 하며, 이를 위해 V2X 통신기술이 필수적임.



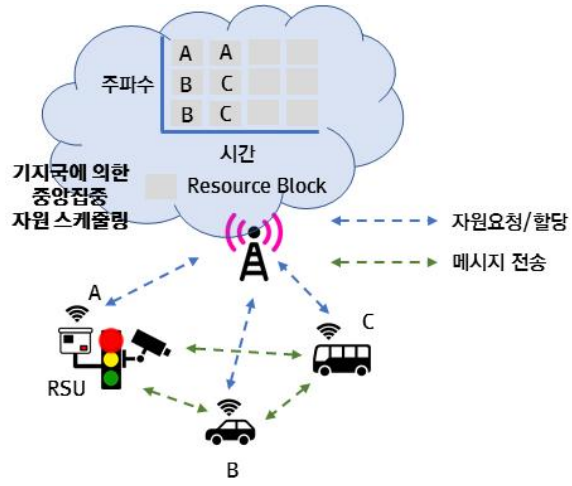
[자율주행을 위한 V2X 통신의 표준화 현황]

- 현재, IEEE 802.11p/WAVE와 3GPP LTE 기반의 Cellular V2X(C-V2X, Release 14) 표준이 완성되어 C-ITS 서비스를 위한 V2X 통신 기술로 사용될 수 있음.
- 또한, 2018년 6월에 3GPP 5G 기술인 Relesase 15에 LTE 기반의 enhanced V2X(eV2X, Release 15) 표준이 완성되어 C-ITS 서비스와 협력자율주행을 위한 V2X 통신 기술로 상용화 예정에 있음.

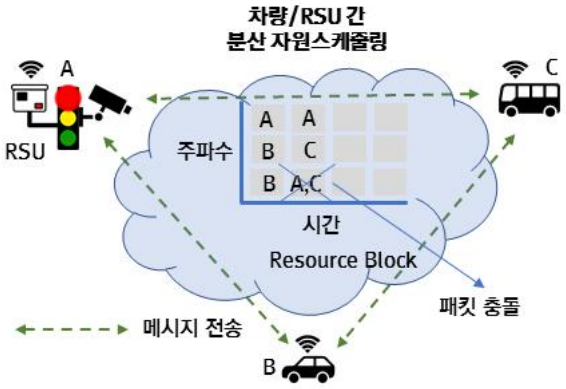
- 협력자율주행을 지원하기 위해서는 V2X 통신이 매우 낮은 지연과 높은 신뢰도를 가지고 있어야 하며, 이를 위해 5G에서는 새로운 NR(New Radio) 기반의 C-V2X인 5G NR C-V2X에 대한 표준을 개발 중이며, 2019년까지 5G C-V2X 표준인 Release 16을 개발 완료할 예정임.
- 따라서, 자율주행 level 3가 상용화되고 5G C-V2X 도입되기 이전까지는 현재 개발되어 있는 LTE 기반의 4G C-V2X와 5G eV2X가 협력자율주행을 위한 V2X 통신으로 사용될 것임. 또한, 향후 개발될 NR 기반 5G C-V2X가 상호 보완적으로 운용될 것임.

○ **협력자율주행을 지원하기 위해 C-V2X/eV2X의 분산혼잡제어 기술 현황**

- C-V2X/eV2X는 C-ITS 서비스를 지원하기 위해 20ms~100ms 이하의 지연 (latency)과 90%의 패킷 전송률 (Packet Delivery Ratio, PDR) 성능을 목표로 하고 있음. 그러나, 자율주행을 지원하기 위해서는 10ms 이하의 지연과 99.99% 이상의 PDR 성능이 요구되기 때문에 C-V2X/eV2X에 대한 성능 개선이 필수적으로 요구됨.
- 특히, 협력자율주행의 협력 머뉴버링과 협력 센싱을 위한 차량간 V2V 통신과 차량과 RSU간 V2R/R2V 통신에서 사용되는 메시지를 요구 지연 시간과 패킷 전송률을 만족시키는 것이 필수적임.
- 이를 위해서, 메시지 전송을 위한 무선통신 자원을 효과적으로 할당하는 것이 매우 중요하며, C-V2X/eV2X에서는 기지국에서 중앙 집중식 스케줄링으로 자원을 할당하는 mode 3와 차량간/차량과 RSU간에 예약 및 경쟁방식 기반 분산 스케줄링으로 자원을 배분하는 mode 4가 제안되어 있음.
- Mode 3에서는, 차량에서 기지국으로 자원할당을 요청하고 다시 할당하는데 시간 지연이 상당히 발생하기 때문에, 저지연을 요구하는 협력자율주행에서는 mode 4 기반의 메시지 전송이 필수적임.



[C-V2X Mode 3와 시간지연 개념]



[C-V2X Mode 4와 패킷 충돌 개념]

- 그러나, 현재 수준에서는, mode 4에서 C-V2X와 eV2X 모두 차량의 밀도가 증가함에 따라, 예약 및 경쟁방식 기반 분산 스케줄링에서 발생하는 자원 중복 할당에 의한 패킷 충돌에 의해, 패킷 전송률이 감소하고 지연 시간이 매우 증가한다는 연구결과들이 다수 발표되고 있음.
- 이를 해결하기 위해 현재 C-V2X/eV2X Mode 4 표준에서는 차량 밀도 증가에 의한 혼잡을 제어할 수 있도록 분산혼잡제어(Decentralized Congestion Control, DCC) 알고리즘을 지원할 수 있도록 체계를 구성 하였지만, 구체적으로 운용할 분산혼잡제어 알고리즘과 파라메터들에 대해 명시하지 않고 있음.
- 이는 분산혼잡제어를 운용하는 환경이나 서비스 종류에 따라 사용되는 분산혼잡제어 알고리즘과 parameter 최적화가 서로 달라지기 때문에, V2X 네트워을 운용하는 주체가 운용환경과 목표 서비스에 적합한 분산혼잡제어 알고리즘과 parameter 최적화를 수행해야 하기 때문임.
- **따라서, 자율주행을 위한 국내 교통 환경과 목표로 하는 자율주행 서비스에 따라 최적화된 분산혼잡제어 알고리즘과**

parameter 최적화 기술 개발이 요구됨.

○ **협력자율주행서비스 성능 분석 위한 연구 및 시뮬레이터는 다음과 같이 각 계층의 개별적인 성능 평가에 머무르고 있음.**

- C-V2X/eV2X의 물리계층 성능 분석을 위한 링크레벨 시뮬레이션
- MAC 계층에서의 Sensing-based Semi-Persistent Scheduling에 의한 패킷 전송율과 전송 지연을 분석하기 위한 ns-3 네트웍 시뮬레이션
- 협력자율주행 서비스(협력센싱, 협력머뉴버링)의 응용계층 성능을 분석하기 위한 mcroscopic traffic 시뮬레이션
- **따라서, V2X 물리계층과 MAC계층, 그리고 협력자율주행 서비스 계층의 성능을 통합적으로 분석할 수 있는 시뮬레이션 플랫폼 개발이 필요함.**

라. 연구개발의 목표 및 내용

(1) 연구개발의 최종 목표 및 최종 성과물

구 분	내용 및 설정 근거
최종 목표	-본 연구에서는 3GPP LTE 기반의 4G C-V2X(Rel.14) / 5G LTE eV2X(Rel.15)의 차량간 통신(V2V)과 차량과 RSU(Road Side Unit)간 통신(V2R/R2V)을 수행하는 Mode 4에서, 도심의 다양한 운행 환경 및 차량 밀도 그리고 협력자율주행 서비스에 따라 메시지 전송주기 및 송신전력 등을 적응적으로 최적화하는 V2X 네트웍 분산혼잡제어 기술을 개발함. -또한, 개발된 V2X 네트웍 분산혼잡제어 기술의 성능을 자율협력주행 시나리오 기반 트래픽 시뮬레이터와 V2X의 PHY/MAC cross-layer 시뮬레이터가 연동된 자율협력주행 통합 시뮬레이션 플랫폼을 통해 분석하고 검증을 수행함.
세부 목표	-자율협력주행을 위한 V2X 네트웍의 분산혼잡제어 원천기술 개발 -V2X의 무선채널, 물리(PHY) 계층, 그리고 MAC 계층이 결합된 다계층(cross-layer) 시뮬레이터 개발 및 성능평가 -자율협력주행 시나리오 기반 트래픽 시뮬레이터와 V2X의 PHY/MAC cross-layer 시뮬레이터가 연동된 자율협력주행 통합 시뮬레이션 플랫폼 개발 -교통환경 및 자율협력주행 시나리오 기반 V2X 네트웍 분산혼잡제어 성능 평가

(2) 최종성과물의 기술성숙도 설정근거

구분		연구착수	연구종료	단계별 설명
기초연구 단계	TRL 1	□	□	TRL 1 이론적 연구단계
	TRL 2	■	□	TRL 2 기술적 개념정립 단계
실험 단계	TRL 3	□	□	TRL 3 실험적 증명 단계
	TRL 4	□	■	TRL 4 실험실 성능평가 단계
시작품 단계	TRL 5	□	□	TRL 5 유사환경 시험 단계
	TRL 6	□	□	TRL 6 유사환경 기술시범 단계
실용화 단계	TRL 7	□	□	TRL 7 실제환경 시작품 데모 단계
	TRL 8	□	□	TRL 8 시제품 설치 및 성능시험 단계
사업화 단계	TRL 9	□	□	TRL 9 현장적용/사업화 단계

최종 성과물	기술성숙도(TRL)		설정 근거
	연구시작시	연구종료시	
자율협력주행을 위한 V2X 통신 네트웍의 분산혼잡제어 기술	2	4	• (연구시작시) - 개발하는 분산혼잡제어 기술은 기존 이론을 바탕으로 3GPP LTE C-V2X / 5G LTE eV2X 표준과 협력자율주행에 적합하도록 신규 기술을 도출하고 개발함. - 개발된 분산혼잡제어 기술에 대해 특허 출원과 논문 게재할 것임. • (연구종료시) - 개발하는 자율협력주행을 위한 V2X 네트웍 분산혼잡 제어 기술에 대해 다양한 교통환경에서 자율협력주행 시나리오에 기반하여 트래픽 시뮬레이터와 V2X 다계층 시뮬레이터가 연동된 자율협력주행 통합 시뮬레이션 플랫폼에서 성능을 시험하고 최적화를 수행함.

(3) 연차별 연구기관별 연구 개발 목표 및 내용

(가) 1차 연도

① 개발 목표

연구목표	주요연구내용	연구 수행기관
자율협력주행을 위한 V2X 네트웍 분산혼잡제어 기술	- 3GPP LTE C-V2X(Rel.14) / 5G LTE eV2X(Rel.15)의 Mode 4 표준분석 및 기존 V2X 네트웍 분산혼잡제어 기술 조사 - 기존 V2X 네트웍 분산혼잡제어 기술에 대한 성능 분석을 통한 분산혼잡제어를 위한 파라메터 도출 - 차량 밀도 및 이동속도, 그리고 교통환경에 따라 적응적으로 최적화하는 V2X 네트웍 분산혼잡제어 기술 아이디어 도출 - 협력자율주행 서비스별 상이한 요구 성능을 동시에 만족시키는 V2X 네트웍 분산혼잡제어 기술 아이디어 도출	연세대학교
C-V2X Cross-layer (PHY/MAC) 시뮬레이터	- 3GPP LTE C-V2X(Rel.14) / 5G LTE eV2X(Rel.15)의 PHY와 MAC 표준 분석을 통한 MAC 계층 Sensing-based Semi-Persistent Scheduling 기술 분석 - 각 계층별(무선채널/PHY/MAC) 시뮬레이터 개발 - 각 계층별(무선채널/PHY/MAC) 시뮬레이터 성능 검증	한밭대학교
자율협력주행 통합 시뮬레이션 플랫폼	- 협력 센싱, 협력 머뉴버링, 플래투닝의 협력자율주행 서비스별 평가 시나리오 분석을 통한 시나리오 도출 - 협력자율주행 서비스에 필요한 V2V 교환 정보를 정의하고 이에 대한 메시지 개발 - Prescan 기반 협력자율주행 시나리오 수행 트래픽 시뮬레이터 개발 - 개발된 메시지를 트래픽 시뮬레이터에 구현하고 협력자율주행 서비스별 시나리오별로 성능 검증	한국교통대학교



② 개발 내용 및 범위

○ 공동연구기관(연세대학교)

주요 연구내용	세부연구내용
선행연구 사례조사	- 3GPP LTE 기반의 4G C-V2X(Rel.14) / 5G LTE eV2X(Rel.15)의 Mode 4 표준분석 - 기존 V2X 네트웍 분산혼잡제어 기술 조사 - 협력자율주행 서비스(협력 센싱, 협력 머뉴버링, 플래투닝)별 지연(latency)와 신뢰도 (packet delivery rate) 요구 성능 분석
선행연구 성능분석	- 기존 V2X 네트웍 분산혼잡제어 기술에 대한 성능 분석 - 기존 기술 장단점 분석 - V2X 네트웍 분산혼잡제어를 위한 파라메터 도출
신규 기술 아이디어 도출	- 차량 밀도 및 이동속도, 그리고 교통환경에 따라 적응적으로 최적화하는 V2X 네트웍 분산혼잡제어 기술 아이디어 도출 - 협력자율주행 서비스별 상이한 요구 성능을 동시에 만족시키는 V2X 네트웍 분산혼잡제어 기술 아이디어 도출

- 선행연구 사례조사
  - ✓ 3GPP LTE 기반의 4G C-V2X(Rel.14) / 5G LTE eV2X(Rel.15)의 Mode 4 표준분석을 통해 V2V의 자원 할당 방식 분석.
  - ✓ 기존 V2X 네트웍 분산혼잡제어 기술 조사를 통한 비교 기술 선정
  - ✓ 협력자율주행 서비스 별 요구성능 분석을 통한 신규 기술의 성능 목표치 설정
- 선행연구 성능분석
  - ✓ 기존 V2X 네트웍 혼잡제어 기술에 대한 성능 및 장단점 분석을 통한 현재 기술들의 문제점 파악
  - ✓ V2X 네트웍 분산혼잡제어에 영향을 줄 수 있는 파라메터를 도출하고 이를 통해 협력자율주행의 성능을 향상시킬 수 있는 파라메터 선별함으로써 신규 아이디어 도출에 도움을 줄 수 있음.
- 신규 기술 아이디어 도출
  - ✓ 차량 밀도 및 이동속도 그리고 교통환경의 변화에 따라 적응적으로 성능을 최적화하는 V2X 네트웍 분산혼잡제어 기술 아이디어 도출
  - ✓ 협력자율주행이 혼재된 상황에서 서비스 별 상이한 요구조건을 동시에 만족시킬 수 있는 V2X 네트웍 분산혼잡제어 기술 아이디어 도출

○ 공동연구기관(한밭대학교)

주요 연구내용	세부연구내용
선행연구 사례조사	- 3GPP LTE 기반의 4G C-V2X(Rel.14) / 5G LTE eV2X(Rel.15)의 PHY와 MAC 표준 분석 - C-V2X/eV2X의 MAC 계층 Sensing-based Semi- Persistent Scheduling 기술 분석 - 도심 V2V 채널 모델 분석
각 계층별(무선채널/PHY/MAC) 시뮬레이터 개발	- 도심 V2V 채널 모델 구현 - 3GPP V2X의 PHY 시뮬레이터 구현 - 3GPP V2X의 MAC 계층 Sensing-based Semi- Persistent Scheduling 시뮬레이터 구현
각 계층별(무선채널/PHY/MAC) 시뮬레이터 성능 검증	- 도심 V2V 채널 시뮬레이터 성능 검증 - 3GPP V2X의 PHY 시뮬레이터 성능 검증 - 3GPP V2X의 MAC 계층 Sensing-based Semi- Persistent Scheduling 시뮬레이터 성능 검증

- 선행연구 사례조사
  - ✓ 3GPP LTE 기반의 4G C-V2X(Rel.14) / 5G LTE eV2X(Rel.15)의 PHY/MAC 표준분석을 통해 시스템 파라메터 분석 및 구현 단계 설정
  - ✓ V2X의 MAC 계층 Sensing-based Semi- Persistent Scheduling 기술 분석을 통한 동작 방식 분석
  - ✓ 도심 환경에서의 Rician factor, pathloss, delay spread, Doppler spread를 고려하기 위한 V2V 채널 모델 분석
- 각 계층별(무선채널/PHY/MAC) 시뮬레이터 개발
  - ✓ 선행연구 사례조사에 얻은 정보를 기반으로 도심 V2V 채널 모델, 3GPP LTE 기반 4G C-V2X(Rel.14) / 5G LTE eV2X(Rel.15)의 PHY와 MAC 계층의 Sensing-based Semi-Persistent Scheduling 시뮬레이터 구현
- 각 계층별(무선채널/PHY/MAC) 시뮬레이터 성능 검증
  - ✓ 각 계층별 시뮬레이터 성능 검증을 통한 개발된 시뮬레이터의 신뢰성 검증

○ 주관연구기관(한국교통대학교)

주요 연구내용	세부연구내용
선행연구 사례조사	- 협력 센싱, 협력 머뉴버링, 플래투닝의 협력자율주행 서비스별 평가 시나리오 분석 - 도심 교통환경 모델 분석
협력자율주행 서비스별 메시지 개발	- 협력 센싱, 협력 머뉴버링, 플래투닝의 협력자율주행 서비스별 서비스 시나리오 도출 - 협력자율주행 서비스에 필요한 V2V 교환 정보를 정의하고 이에 대한 메시지 개발
협력자율주행 트래픽 시뮬레이터 개발	- Prescan 기반 협력자율주행 시나리오 수행 트래픽 시뮬레이터 개발 - 개발된 메시지를 트래픽 시뮬레이터에 구현하고 협력자율주행 서비스별 시나리오별로 성능 검증

- 선행연구 사례조사
  - ✓ 협력 센싱, 협력 머뉴버링, 플래투닝의 협력자율주행 서비스별 평가 시나리오 및 도심 교통환경 모델 분석을 통해 실제 협력자율주행 서비스에 대한 차량 및 기지국의 도로 운용환경 분석
- 협력자율주행 서비스별 메시지 개발

✓ 협력 센싱, 협력 머뉴버링, 플래투닝의 협력자율주행 서비스별 서비스 시나리오 도출을 통해 트래픽 시뮬레이터 구현 단계 설정

✓ 협력자율주행 서비스에 필요한 V2V 교환 정보를 정의하고 메시지 포맷을 개발함으로써 기존 메시지 포맷 대비 효율성을 증가시킬 수 있음. 이는 V2V의 메시지 정보에 의해 혼잡 정도를 제어하는 V2X 네트웍 분산혼잡제어 기술의 성능 향상에 기여할 수 있음.

- 협력자율주행 트래픽 시뮬레이터 개발

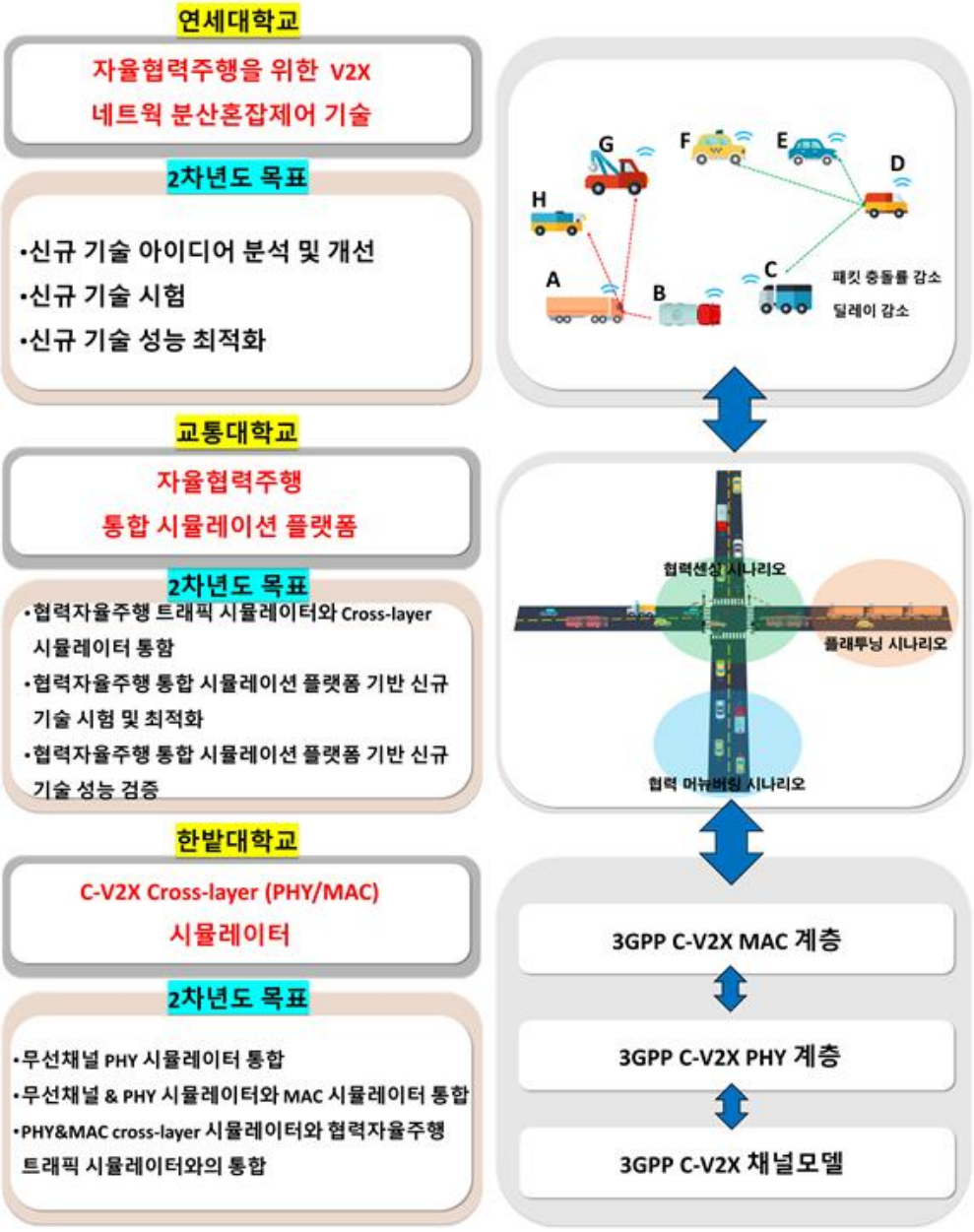
✓ 기존 검증된 microscopic 트래픽 시뮬레이터인 Prescan을 이용하여 협력자율주행 시나리오를 모델링하고 차량 분포 및 각 차량의 이동 궤적을 포함하는 트래픽 시뮬레이터 개발

✓ 개발된 메시지를 트래픽 시뮬레이터에 구현하고 협력자율주행 서비스의 시나리오 별 성능 검증을 통해 메시지의 신뢰성 검증

(나) 2차 연도

① 개발 목표

연구목표	주요연구내용	연구 수행기관
자율협력주행을 위한 V2X 네트웍 분산혼잡제어 기술	- 개발된 V2X 네트웍 분산혼잡제어 기술을 자율협력주행 통합 시뮬레이션 플랫폼에 구현하고 성능을 분석 - 차량 밀도 및 이동속도, 그리고 교통환경에 따라 개발된 V2X 네트웍 분산혼잡제어 기술의 성능을 분석하고 최적화 수행 - 다양한 도심환경에서 협력자율주행 시나리오 별로 V2X 분산혼잡제어 기술에 의한 협력자율주행 성능 검증	연세대학교
C-V2X Cross-layer (PHY/MAC) 시뮬레이터	- 무선채널과 PHY 시뮬레이터 통합 - 무선채널 & PHY 시뮬레이터와 MAC 시뮬레이터 통합 - PHY&MAC cross-layer 시뮬레이터와 협력자율주행 트래픽 시뮬레이터와의 통합	한밭대학교
자율협력주행 통합 시뮬레이션 플랫폼	- 협력자율주행 트래픽 시뮬레이터와 Cross-layer 시뮬레이터 통합 - 협력자율주행 통합 시뮬레이션 플랫폼 기반 신규 기술 시험 및 최적화 - 협력자율주행 통합 시뮬레이션 플랫폼 기반 신규 기술 성능 검증	한국교통대학교



② 개발 내용 및 범위

○ 공동연구기관(연세대학교)

주요 연구내용	세부연구내용
신규 기술 아이디어 분석 및 개선	- V2X의 MAC계층 시뮬레이션을 통한 신규 기술 아이디어 성능 분석 및 개선
신규 기술 시험	- 개발된 V2X 네트웍 분산혼잡제어 기술을 자율협력주행 통합 시뮬레이션 플랫폼에 구현하고 성능을 분석
신규 기술 성능 최적화	- 차량 밀도 및 이동속도, 그리고 교통환경에 따라 개발된 V2X 네트웍 분산혼잡제어 기술의 성능을 분석하고 최적화 수행 - 협력자율주행 서비스가 혼재된 상황에서 V2X 네트웍 분산혼잡제어 기술의 성능을 분석하고 최적화 수행
신규 기술 성능 검증	- 다양한 도심환경에서 협력자율주행 시나리오 별로 V2X 분산혼잡제어 기술에 의한 협력자율주행 성능 검증

- 신규 기술 아이디어 분석 및 개선
  - ✓ V2X의 MAC계층 시뮬레이션을 통한 신규 기술 아이디어 성능 분석 및 개선점을 파악하여 신규 기술에 적용
- 신규 기술 시험
  - ✓ 개발된 V2X 네트웍 분산혼잡제어 기술을 자율협력주행 통합 시뮬레이션 플랫폼에 구현하고 성능을 분석하여 신규 기술의 성능 평가
- 신규 기술 성능 최적화
  - ✓ 차량 밀도 및 이동속도 그리고 교통환경의 변화에 따라 개발된 V2X 네트웍 분산혼잡제어 기술의 성능을 분석하고 최적화 수행
  - ✓ 협력자율주행이 혼재된 상황에서 서비스 별 개발된 V2X 네트웍 분산혼잡제어 기술의 성능을 분석하고 최적화 수행
- 신규 기술 성능 검증
  - ✓ 다양한 도심환경에서 협력자율주행 시나리오 별로 V2X 분산혼잡제어 기술에 의한 협력자율주행 성능 검증을 통한 개발된 기술의 목표치 달성 검증

○ 공동연구기관(한밭대학교)

주요 연구내용	세부연구내용
무선채널과 PHY 시뮬레이터 통합	- 도심 V2V 채널 시뮬레이터와 3GPP LTE C-V2X(Rel.14) /5G LTE eV2X(Rel.15)의 PHY 시뮬레이터 통합 - 채널 환경에 따른 무선채널과 PHY 통합 성능 검증
무선채널 & PHY 시뮬레이터와 MAC 시뮬레이터 통합	- 무선 채널 & PHY 시뮬레이터와 MAC 계층 Sensing-based Semi-Persistent Scheduling 시뮬레이터 통합 구현 - PHY와 MAC 통합 cross-layer 시뮬레이터 성능 검증
PHY&MAC cross-layer 시뮬레이터와 협력자율주행 트래픽 시뮬레이터와의 통합	- Cross-layer(PHY/MAC) 및 traffic 시뮬레이터와 통합 운용 및 운용 성능 최적화 연구 - 통합 운용 성능 검증

- 무선채널과 PHY 시뮬레이터 통합
  - ✓ 도심 V2V 채널 시뮬레이터와 3GPP LTE 기반 4G C-V2X(Rel.14) / 5G LTE eV2X(Rel.15)의 PHY 시뮬레이터 통합
  - ✓ 채널 환경에 따른 무선채널과 PHY 통합 성능 검증을 통한 시뮬레이터 신뢰성 검증
- 무선채널 & PHY 시뮬레이터와 MAC 시뮬레이터 통합
  - ✓ 무선 채널 & PHY 시뮬레이터와 MAC 계층 Sensing-based Semi-Persistent Scheduling 시뮬레이터 통합 구현
  - ✓ PHY와 MAC 통합 cross-layer 시뮬레이터 성능 검증을 통한 신뢰성 검증
- PHY&MAC cross-layer 시뮬레이터와 협력자율주행 트래픽 시뮬레이터와의 통합
  - ✓ Cross-layer(PHY/MAC) 및 traffic 시뮬레이터와 통합 운용 및 운용 성능 최적화 연구
  - ✓ 통합 운용 성능 검증을 통한 통합 시뮬레이터의 신뢰성 검증

○ 주관연구기관(한국교통대학교)

주요 연구내용	세부연구내용
협력자율주행 트래픽 시뮬레이터와 Cross-layer 시뮬레이터 통합	- Matlab simulink 기반 3GPP LTE 기반의 4G C-V2X(Rel.14) / 5G LTE eV2X(Rel.15)의 PHY 계층과 MAC계층 통합 cross-layer 시뮬레이터 구현 - Prescan 협력자율주행 시뮬레이터와 cross-layer 시뮬레이터간 연동 위한 API 구현 및 통합 - 통합 운용 성능 검증
협력자율주행 통합 시뮬레이션 플랫폼 기반 신규 기술 시험 및 최적화	- 개발된 V2X 네트웍 분산혼잡제어 기술을 자율협력주행 통합 시뮬레이션 플랫폼에 구현하고 성능을 분석 - 성능 분석에 기반한 V2X 네트웍 분산혼잡제어 기술 최적화 수행
협력자율주행 통합 시뮬레이션 플랫폼 기반 신규 기술 성능 검증	- 차량 밀도 및 이동속도, 그리고 교통환경에 따라 개발된 V2X 네트웍 분산혼잡제어 기술의 성능 검증 - 협력자율주행 서비스가 혼재된 상황에서 V2X 네트웍 분산혼잡제어 기술의 성능 검증

- 협력자율주행 트래픽 시뮬레이터와 Cross-layer 시뮬레이터 통합
  - ✓ Matlab simulink 기반 3GPP LTE 기반 4G C-V2X(Rel.14) / 5G LTE eV2X(Rel.15)의 PHY 계층과 MAC계층 통합 cross-layer 시뮬레이터를 구현
  - ✓ Prescan 협력자율주행 시뮬레이터와 cross-layer 시뮬레이터간 연동을 위한 API 구현 및 통합
  - ✓ 통합 운용 성능 검증을 통한 시뮬레이터 신뢰성 검증
- 협력자율주행 통합 시뮬레이션 플랫폼 기반 신규 기술 시험 및 최적화
  - ✓ 개발된 V2X 네트웍 분산혼잡제어 기술을 자율협력주행 통합 시뮬레이션 플랫폼에 구현하고 성능을 분석을 수행하여 개선점 및 문제점 파악
  - ✓ 성능 분석에 기반한 V2X 네트웍 분산혼잡제어 기술 최적화 수행
- 협력자율주행 통합 시뮬레이션 플랫폼 기반 신규 기술 성능 검증
  - ✓ 차량 밀도 및 이동속도 그리고 교통환경의 변화에 따라 개발된 V2X 네트웍 분산혼잡제어 기술의 성능 검증 통한 개발된 기술의 목표치 달성 검증
  - ✓ 협력자율주행이 혼재된 상황에서 서비스 별 개발된 V2X 네트웍 분산혼잡제어 기술의 성능을 분성능 검증을 통한 개발된 기술의 목표치 달성 검증

2. 연구수행내용 및 성과

가. 연구개발의 추진전략·방법 및 추진체계

(1) 연구개발 추진체계·방법

(가) 연구기관간 유기적 연계와 상호 검증 수행

○ 각 분야의 전문성을 보유하고 있는 연구 기관별로 세부 과제를 심도 있게 수행

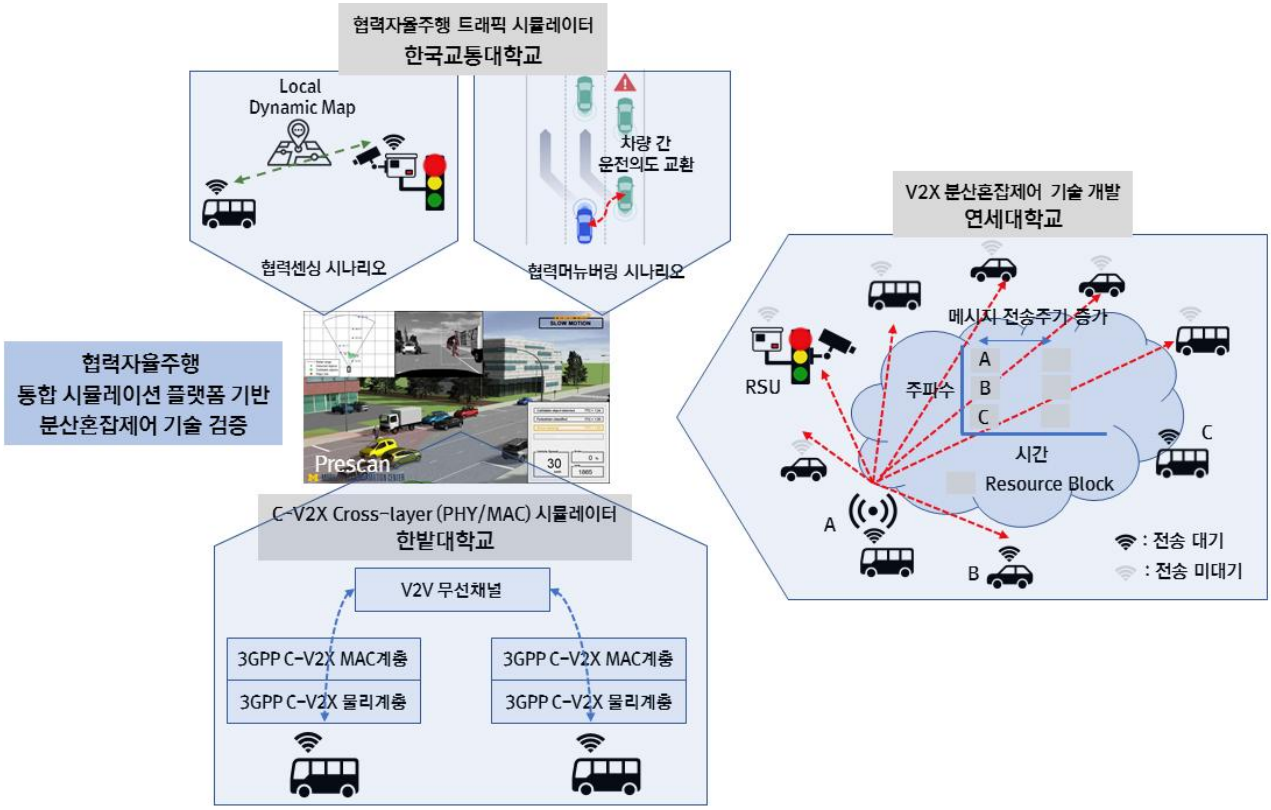
- 연세대학교는 WAVE 기반의 물리계층과 MAC 계층 통합 성능 분석을 통해 네트웍 분산혼잡제어 기술을 개발한 연구성과를 보유하고 있기 때문에, 3GPP C-V2X 기반의 네트웍 분산혼잡제어 기술 개발을 위한 기반을 구축하고 있음.
- 한밭대학교는 3GPP LTE 물리계층 성능 분석을 위한 링크레벨 시뮬레이터와 시스템 레벨 시뮬레이터 개발 성과를 보유하고 있기 때문에, C-V2X의 물리계층과 MAC 계층 Cross-layer 시뮬레이터 구축에 전문성을 가지고 있음.
- 한국교통대학교는 C-ITS 안전서비스 성능 분석을 위한 V2X 다계층 통합 시뮬레이션 플랫폼 개발 사업을 통해 "자율협력주행 통합 시뮬레이션 플랫폼" 세부과제를 수행할 수 있는 기반을 구축하고 있으며, 협력자율주행에 기반한 자율주행 셔틀 시스템을 개발한 성과를 보유하고 있기 때문에, 협력자율주행 시나리오 도출 및 시뮬레이터 구축에 전문성을 가지고 있음.

○ 세부 과제의 유기적인 통합을 통한 최종 연구목표 달성

- 본 연구팀은 2003년도부터 현재까지 공동연구를 수행해 오면서 많은 우수한 성과를 배출함. 대표적으로 삼성전자 3GPP2/3GPP 표준화팀과 함께 MIMO, network MIMO, distributed antenna system, 펨토셀 기술 등에 대한 15건의 공동 기술 개발을 통해 MIMO 및 이동통신 무선 네트웍 관련 원천 기술을 확보하고 있으며 20여건의 국제 등록 특허를 확보하고 있음. 특히, MIMO 및 network MIMO에 대한 3GPP 표준 기술을 2건 확보한 바 있음.

○ 연구기관간 상호 검증 수행

- 각 연구기관에서 수행한 세부 연구결과를 통합하기 전에 다른 연구기관의 세부 연구결과를 검증하여 통합 전에 오류를 최소화하는 상호 검증을 수행함
- 이를 통해 각 연구기관에서 수행한 세부 연구결과들을 심도 있게 공유할 수 있으며, 이를 기반으로 세부 연구결과들을 유기적으로 통합할 수 있음.



[연구기관별 세부과제 심도 수행과 상호 검증을 통한 유기적 통합]

(나) 본 연구팀이 보유하고 있는 자체 연구결과의 확대 발전

○ 본 연구팀은 2003년도부터 현재까지 삼성전자 3GPP 표준화팀과 함께 MIMO, network MIMO, distributed antenna system, 펨토셀 기술 등에 대한 15건의 공동 기술 개발을 통해 MIMO 및 이동통신 무선 네트워 관련 원천 기술을 확보하고 있으며 20여건의 국제 등록 특허를 확보하고 있음.

○ 또한, 본 연구팀은 “소형 개인 셀 합성 기술을 사용하는 분산 거대 안테나 기술 연구”,“다중 무선접속 클라우드 기지국을 위한 소형 개인 셀 합성 기술 연구”, “대형셀 주파수 이용효율 제고를 위한 공간편파 분할 다중접속 기반 Massive MIMO 기술 개발”, “송신편파제어 기반 공간-편파 다차원 다중접속기술 개발”등의 과제를 공동 수행하면서, 5G 이동통신 기술 개발을 수행하였음.

○ 또한, 본 연구팀은 “다중센서 융·복합 기반 실시간 모바일 교통정보시스템 개발”,“C-ITS 서비스 성능 평가 및 인증을 위한 시뮬레이션 플랫폼 기술 개발”,“자전거 및 이륜차 B2X (Bicycle to Infra/Vehicle) 안전서비스 개발”을 통해 IEEE 802.11p/WAVE 기반 C-ITS 안전서비스 개발, MAC 계층 시뮬레이터 개발, 물리계층에서 채널추정 기법 등과 같이 V2X 통신 기술에 대한 심도 있는 연구를 수행하였음.

○ 본 연구팀이 보유하고 있는 자체 연구결과들을 기반으로 본 연구과제에서 새로 확보해야 할 기술들을 충분히 확보할 수 있음.

○ 보유하고 있는 자체 기술을 기반으로 한 구체적인 추가 기술 확보 방안은 다음과 같음.

주요 확보할 기술	보유하고 있는 자체기술을 기반으로 한 기술 확보 방안
자율협력주행을 위한 C-V2X 네트웍의 분산혼잡제어 원천기술 개발	• 본 연구팀에서 확보하고 있는 WAVE 네트웍의 분산혼잡제어 기술을 기반으로, C-V2X과의 차이점과 협력자율주행 서비스의 성능 요구사

	항을 반영하여, 새로운 C-V2X 기반 분산혼잡제어 기술을 개발
C-V2X의 무선채널, 물리(PHY) 계층, 그리고 MAC 계층이 결합된 다계층(cross-layer) 시뮬레이터 개발 및 성능평가	• 기 확보하고 있는 WAVE의 PHY와 MAC 통합 cross-layer 시뮬레이터를 기반으로, C-V2X 기반의 croos-layer 시뮬레이터로 개선 및 확장하여 개발
자율협력주행 시나리오 기반 트래픽 시뮬레이터와 C-V2X/eV2X의 PHY/MAC cross-layer 시뮬레이터가 연동된 자율협력주행 통합 시뮬레이션 플랫폼 개발	• C-ITS 서비스 성능 평가를 위한 시뮬레이션 플랫폼 기술 개발을 통해 구축한 WAVE 다계층(무선채널, PHY, MAC, 응용계층)통합 시뮬레이터를 기반으로, C-V2X 기반의 자율협력주행 통합 시뮬레이터로 개선 및 확장하여 개발
교통환경 및 자율협력주행 시나리오 기반 V2X 네트웍 분산혼잡제어 성능 평가	• 한국교통대학교는 현재 협력센싱에 기반한 자율주행 셔틀 시스템을 개발하고 이의 성능을 시범 서비스를 통해 검증하고 있기 때문에, 이에 대한 연구성과를 바탕으로 협력자율주행에 대한 시나리오 개발, 성능평가 방법, 평가 지표 등을 적정하고 구체적으로 수립할 수 있음.

(2) 연구개발 추진체계

연구개발과제	
과제명	자율협력주행을 위한 V2X 통신 네트웍의 혼잡 제어 기술 및 통합 성능 평가 시뮬레이션 플랫폼 개발

총 참 여 연 구 원
주관연구책임자 (문철)외 15명

기 관 별 참 여 현 황			
구 분	기관수	인원수	총인원 수
산 업 계	-	-	16
대 학	3	16	
국공립(연)	-	-	
출 연 (연)	-	-	
기 타	-	-	

주관 연구기관	공동 연구기관	공동 연구기관
한국교통대학교	연세대학교	한밭대학교
참 여 연 구 원	**참 여 연 구 원**	**참 여 연 구 원**
주관연구책임자 (문철)외 4명	연구책임자 (육종관)외 7명	연구책임자 (조한신)외 2명
책임급 1명, 원급 4명	책임급 1명, 원급 7명	책임급 1명, 원급 2명
담당연구개발내용	**담당연구개발내용**	**담당연구개발내용**
• 연구총괄 • 협력자율주행 V2V 메시지 포맷 및 트래픽 시뮬레이터 개발 • 시뮬레이터 연동을 위한 API 개발 • 통합 시뮬레이터 및 신규 개발 기술 성능 검증	• V2X 네트웍 분산혼잡제어 기술 개발 • V2X 네트웍 분산혼잡제어 기술 최적화 • V2X 네트웍 분산혼잡제어 기술 성능 검증	• 시뮬레이터 구현 (V2V 채널 모델, C-V2X/eV2X PHY 및 MAC) • 시뮬레이터통합(PHY&MAC cross-layer 및 traffic 시뮬레이터) • 통합 시뮬레이터 성능 검증

(2) 추진일정

(가) 1차 연도

일련 번호	연구내용	4	5	6	7	8	9	10	11	12	책임자 (소속기관)
1	기존 V2X 네트웍 분산혼잡 제어 기술 조사 및 협력자율주행 서비스 요구 성능 분석										육종관 (연세대)
2	기존 V2X 네트웍 분산혼잡 제어 기술 분석 및 V2X 네트웍 분산혼잡 제어를 위한 파라메터 도출										육종관 (연세대)
3	V2X 네트웍 혼잡제어 신규 기술 아이디어 도출										육종관 (연세대)
4	도심 V2V 채널 모델 및 3GPP C-V2X/eV2X PHY&MAC 표준 조사										조한신 (한밭대)
5	각 계층별(무선채널/PHY/MAC) 시뮬레이터 개발										조한신 (한밭대)
6	각 계층별(무선채널/PHY/MAC) 시뮬레이터 성능 검증										조한신 (한밭대)
7	협력 센싱, 협력 머뉴버링, 플래투닝의 협력자율주행 서비스별 평가 시나리오 및 도심 교통환경 모델 분석										문 철 (교통대)
8	협력자율주행 시나리오 도출 및 V2V 메시지 포맷 개발										문 철 (교통대)
9	협력자율주행 트래픽 시뮬레이터 개발 및 V2V 메시지 포맷 성능 검증										문 철 (교통대)

(나) 2차 연도

일련 번호	연구내용	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	책임자 (소속기관)
1	C-V2X/eV2X의 MAC계층 시뮬레이션을 통한 신규 기술 아이디어 성능 분석 및 개선													육종관 (연세대)
2	통합 시뮬레이션 플랫폼을 통한 신규 기술 성능 분석													육종관 (연세대)
3	신규 기술 최적화 및 성능 검증													육종관 (연세대)
4	도심 V2V 채널 시뮬레이터와 3GPP C-V2X/eV2X의 PHY 시뮬레이터 통합													조한신 (한밭대)
5	무선 채널 & PHY 시뮬레이터와 MAC 계층 Sensing-based Semi-Persistent Scheduling 시뮬레이터 통합 구현													조한신 (한밭대)
6	Cross-layer(PHY/MAC) 및 traffic 시뮬레이터와 통합 운용 및 운용 성능 최적화 연구 및 통합 운용 성능 검증													조한신 (한밭대)
7	협력자율주행 트래픽 시뮬레이터와 Cross-layer 시뮬레이터간 연동 API 구현 및 통합													문 철 (교통대)
8	협력자율주행 통합 시뮬레이션 플랫폼 기반 신규 기술 시험 및 최적화													문 철 (교통대)
9	협력자율주행 통합 시뮬레이션 플랫폼 기반 신규 기술 성능 검증													문 철 (교통대)

나. 연구 내용

(1) 자율협력주행을 위한 V2X 네트웍 분산혼잡제어 기술 개발

(가) V2X 네트웍 분산혼잡제어 기술 조사 및 협력자율주행 서비스 요구 성능 분석

(가)-① V2X 네트웍 분산혼잡 제어 개념

○ C-ITS (Cooperative Intelligent Transport Systems)로 알려진 교통안전 및 교통 효율 응용 서비스를 지원하는 VANET (Vehicular Ad Hoc Network)은 차량 간의 직접적인 정보 교환을 제공함.

○ 이러한 서비스를 지원하기 위해 차량용 통신 표준으로써, 무선 LAN 기반의 IEEE 802.11p와 셀룰러 기반의 C-V2X가 표준화되었음.

○ 운전자에게 C-ITS 서비스를 제공하기 위해 차량은 자신의 위치 및 속도와 같은 상태정보를 포함하는 메시지를 정해진 주기에 맞춰 broadcast 통신을 통해 주변 차량에 전달함.

○ Broadcast 통신은 제한된 자원 안에서 같은 채널을 사용하여 수행됨. 그러나 일반적으로 V2V 환경에서의 자원할당은 기지국에 의해 관리되지 않으며 특히 broadcast 통신을 사용하는 경우, IEEE 802.11p 및 C-V2X의 채널 접근 방식은 채널 혼잡을 사전에 막을 수 없음.

○ Broadcast 통신은 메시지를 송신한 차량이 메시지가 정확하게 다른 차량에 도달했는지 확인할 수 없으며 수신 실패로 인한 메시지 재전송이 이루어지지 않음.

○ 또한, 정해진 주기마다 메시지를 broadcast 해야 하므로 채널이 혼잡할 경우, 다음 채널 접속 때에도 똑같은 채널 부하를 겪음.

○ 채널 혼잡으로 인하여 발생하는 전송지연에 의해서 안전 메시지가 늦게 수신되고 패킷 충돌 횟수가 많아지면 수신 확률이 낮아지고 무선 반경이 매우 감소함.

○ 안전 관련 시스템의 경우, 메시지 지연 및 수신율에 영향을 많이 받으므로 분산혼잡제어 (Decentralized Congestion Control)라는 추가적인 알고리즘을 사용하여 무선 채널의 과부하를 회피함.

○ DCC의 목표는 차량 환경에서 나타날 수 있는 빠른 네트워크 토폴로지 변경에도 패킷 충돌을 최소화하고 동일한 채널 부하 조건에서 모든 차량에 동일한 채널 접속 기회를 제공하는 것임.

○ 혼잡제어 알고리즘은 일반적으로 CBR(Channel Busy Ratio)를 사용하여 채널 부하를 측정함. CBR은 채널이 사용 중이라고 감지된 시간과 총 관측 시간 (보통 100ms로 설정) 사이의 비율로 정의되며 CBR에 기초하여, 각 차량에 대한 전송 기회는 사용 중인 혼잡제어 알고리즘에 의해 결정됨.

(가)-①-1. 관련 도로 교통 시나리오 및 차량 밀도

○ DCC는 많은 차량에 의해 발생하는 채널 부하가 정해진 채널 용량에 도달하면 효율성이 매우 증가함. 일반적으로 혼잡 시나리오는 밀도가 높은 경우로 볼 수 있지만, 차량 밀도가 관련 시나리오를 설명하는 유일한 기준은 아님.

○ 도시 교통에서는 도시 내 고속도로를 제외하고 일반적으로 차량이 저속에서 중속으로 이동함. 차량이 밀집 주차된 경우 또는 대기 중인 차량이 많은 시나리오에서 높은 메시지 주기를 정적으로 적용하면 채널 부하가 높아질 위험이 있음.

○ 위 문제는 간단한 주기 조정을 통해 해결할 수 있음. 따라서 다음과 같은 특징을 가진 고속도로에서 더욱

까다로운 시나리오가 발견될 수 있음.

○ 고속도로에서의 차량들의 움직임은 다소 1차원적임. 교통은 고속도로를 따라 여러 개의 평행 차선을 따라 같은 방향으로 이동함. 마주 오는 차량은 보통 중앙 장벽에 의해 분리되며 위협이 되지 않음.

○ 특히, 가장 위험한 순간은 차량이 교통 체증이 끝날 때 상대적으로 빠른 속도로 접근하거나 지나가는 상황임.

○ 일반적인 고속도로에서는 차량 밀도가 급격하게 변하지 않고 다소 연속적으로 변화함. 일반적으로 차량은 자유롭게 이동하며, 같은 방향의 모든 차선에 거의 같은 속도의 차량이 있는 경우 상태가 동기화된 흐름으로 변경됨.

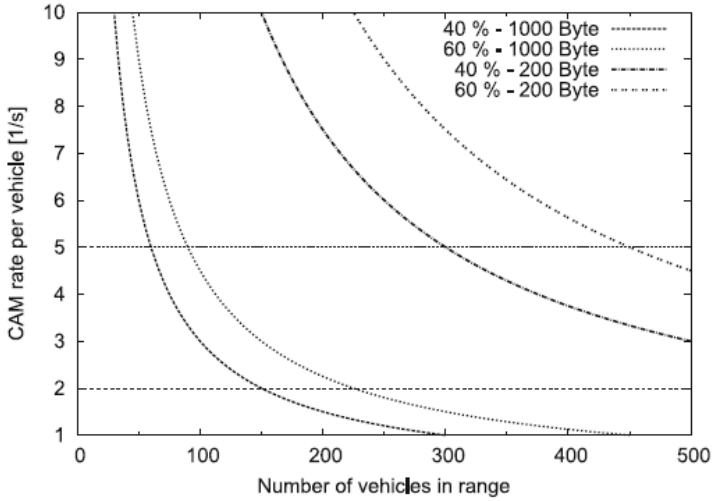
○ 또한, 약간의 왜곡으로 인해 심한 도로교통 정체가 발생함. 이러한 교통흐름의 전환은 트래픽 밀도가 높은 동시에 속도도 상당히 높아서 DCC를 적용하기에 가장 적합한 경우임. 교통 혼잡으로 인해 사고가 발생할 수 있으며, 이는 차량 간 통신을 통해 완화되어야 함.

(가)-①-2. 채널 부하에 따른 위치 데이터 정확도 분석

○ 차량이 감지하는 채널 부하는 범위 내의 차량 수와 개별 메시지 전송 주기에 따라 다름. 예를 들어 메시지 크기가 1,000byte이며 데이터 속도가 6MBit/s일 때 통신 범위에 있는 차량의 수를 300대, 메시지 전송 주기를 1Hz라고 가정하면 40%의 채널 부하를 제공함. 150대의 차량이 초당 2개의 메시지를 보내는 경우 같은 채널 부하에 도달함.

○ 아래 그림은 일반적인 메시지 전송률과 함께 200byte의 중간 크기 패킷과 패킷당 1,000byte의 큰 패킷을 사용하는 두 가지 경우에 대한 채널 부하 (40% 및 60%)를 보여줌.

○ 여기서 높은 차량 밀도 또는 더 큰 패킷의 경우 모든 차량에 대해 높은 메시지 전송률을 지원할 수 없음을 보여줌.



[메세지 주기와 패킷 수에 따른 채널 부하[1]]

○ 채널 부하를 제한하려면 메시지 전송 속도를 조정해야 함. 그러나 결과적으로 감소한 메시지 전송 주기로 인해, 차량이 수신된 메시지로부터 얻을 수 있는 차량별 위치 데이터의 정확도가 감소함.

○ 기본적으로 주어진 평균 이동속도와 특정 메시지 전송 속도에 대해 제공된 부하를 도출할 수 있으며, 이를 통해 차량별 위치 데이터 정확도를 추정할 수 있음.

○ 그러나, 메시지 전송 주기 조절에 대한 논의에서 전송 주기의 이질성(heterogeneity)을 고려해야 함. 같은 속도로 천천히 주행하는 차량으로 인한 교통 체증을 살펴보면, 일정한 메시지 전송 주기에서 차량의 위치는 같은

정확도로 결정될 수 있음.

○ 그러나 마주 오는 트래픽이 정체되지 않고 고속으로 이동한다면, 위의 경우와 같은 메시지 전송 주기는 위치 정확도가 훨씬 떨어짐. 이러한 경우 동일한 정확도 요구사항을 충족하려면 훨씬 높은 메시지 전송 주기가 필요함.

○ 이로 인해 제공된 부하가 채널 용량을 초과하는 상황이 발생할 수 있으며, 메시지 전송 주기는 차량의 현재 상황에 따라 조정되어야 함.

(가)-①-3. 채널 부하에 따른 성능 감소

○ 채널 부하가 증가하면 패킷 충돌 및 손실이 발생하고 이로 인해 채널 접속 지연이 증가하며 유효(effective) 전송 범위가 감소함.

○ 이에 따라 패킷 전송이 지연되고 수신율이 낮아지는 문제가 발생함. 다음은 성능 저하가 발생하는 이유를 나타냄.

○ 동시 전송 : 두 송신기 사이의 거리와 관계없이, 두 개 이상의 차량이 같은 subchannel을 선택하여 송신한다면 패킷 충돌이 발생할 수 있음. 이러한 문제는 숨겨진 노드 문제와 대조적으로 수신 범위 내에서 일어남.

○ 단일/다중 숨겨진 노드 : 수신 중에 반송파 감지 범위를 벗어난 차량 (숨겨진 노드)에 의한 매체 접속 충돌로 인해 SINR이 저하됨. 수신 중, 수신기의 최소 SINR이 낮아지거나 수신기가 패킷을 처음부터 감지할 수 없는 경우 패킷 손실이 발생함. 더욱이, 동시 송신 차량들이 많은 경우 멀리 떨어져 있어도 매우 높은 누적 간섭을 초래할 수 있음.

○ 근거리 인접 노드 : 근거리 송신 스테이션의 인접 채널 간섭으로 인해 SINR이 수신기 요구사항보다 낮아질 수 있음.

○ 결론적으로, 채널 부하가 증가함에 따라 이러한 효과는 수신된 메시지 수를 감소시킴. DCC 메커니즘을 설계할 때 이러한 영향을 고려하여 개발해야 함.

(가)-② 협력자율주행 서비스 요구 성능 분석

(가)-②-1. 협력자율주행 서비스 요구 성능

○ Intelligent transportation system은 정보 기술, 차량 내장 센서 또는 차량 간의 통신을 사용하여 교통 관련 향상된 서비스를 제공하는 것을 목표로 함.

○ 자동차 시장은 완전한 커넥티드 카를 목표로 진화하고 있으며, 이는 사용자 경험을 향상되게 할 뿐만 아니라 자동화된 운전, 추월 보조, 충돌 경고 및 교통 효율성 서비스에도 도움이 됨.

○ ITS/V2X의 몇 가지 사용 사례가 일반적으로 고려되고 있으며 그중 일부는 엄격한 대기 시간 요구사항이 있는 URLLC(Ultra Reliable Low Latency Communication)에 해당함.

○ 통신시스템에 대한 요구사항은 충돌 경고, 자율주행 및 교통 효율성 서비스와 같은 다양한 ITS 사용 사례에서 비롯되며, 지연 시간이 중요한 V2X 애플리케이션의 세 가지 주요 범주는 다음과 같음.

- Collision warning
  - ✓ 충돌 경고에는 위험한 상황에 있는 차량과의 경고 알림이 포함됨. 사고 방지를 위한 다른 모든 수단이 실패하면 충돌 알림이 가장 중요한 요소임.

✓ 차량은 속도, 방향 및 가속도를 제어하여 이러한 메시지를 기반으로 충돌을 피할 수 있으며, 충돌 경고의 요구사항은 고속도로 나 도시 교통과 같은 시나리오에 따라 다르며 10ms에서 100ms 사이의 지연 시간이 필요함. 충돌 경고 메시지는 기지국에서 차량으로 또는 차량에서 차량으로 송신됨. 두 경우 모두 지연 시간 요구사항을 충족해야 함.

- Autonomous driving

✓ 자율주행은 4단계의 자율주행으로 나뉘며, 1단계는 운전자에 의해 제어되며, 4단계는 운전자 개입이 없는 완전 자율 주행을 의미함. 레벨의 증가는 차량이 자율주행을 위해 제공하는 기능에 의해 결정됨.

✓ 완전 자율 주행 차량은 사람의 도움이 필요하지 않으므로, 협력 자율주행 서비스를 위해서는 엄격한 지연 시간과 신뢰성이 필요함. 차량은 다른 차량에서 얻을 수 있는 정보를 자율주행 서비스에 활용할 수 있음.

✓ 수신된 정보는 차량이 교통 및 도로 상황에 적응하는 데 도움을 주며, 셀룰러 통신 시스템은 최소한의 신뢰성 요구사항을 보장하면서 10ms 이하의 지연 시간(bounded latency)을 지원해야 함.

- Traffic efficiency

✓ 대부분의 교통 효율성 중심의 사용 사례에서 도로의 차량 및 기타 요소는 통계적인 정보 (예 : 위치, 속도, 가속) 또는 이벤트 정보 (예 : 도로 상태 및 교통 상황)를 업로드함.

✓ 이러한 데이터 전송은 일반적으로 주기적이며 작은 메시지 크기를 가짐. 이러한 서비스는 100ms 이하의 지연 시간이 요구됨.

Use Case	Latency (ms)	Reliability (PLR)	Device density ($/km^2$)	Number of devices per cell	Comm. range(m)	% of mobile devices	Mobility speed (km/h)	Traffic type
Collision warning	10 to 100	10^{-3} to 10^{-5}	Urban-3000, Hignway-500	Urban-300, Hignway-50	Urban -500, Highway-2000	>90	Urban < 100, Highway < 500	Event triggered
Autonomous driving	10	10^{-5}	Urban-3000, Hignway-500	Urban-300, Hignway-50	Urban -500, Highway-2000	>95	Urban < 100, Highway < 500	Event triggered
Traffic efficiency	< 100	10^{-3}	3000	300	2000	> 80	< 500	Periodic

[지연 시간이 중요한 V2X 사용 사례에 대한 요구사항[2]]

✓ 자율주행에서 level 3 이상으로 고도화되기 위해서는, 차량과 인프라가 인식한 주변 상황을 V2X 통신을 통해 공유하여 차량이 센싱할 수 있는 범위를 확장하는 협력 센싱(cooperative sensing)과 차량 간에 운전 의도를 V2X 통신을 통해 교환하는 협력 머뉴버링(cooperative maneuvering)에 기반한 자율협력주행 기술 개발이 요구되고 있음.

✓ 따라서, 협력 자율주행 서비스는 앞서 설명한 autonomous driving과 비슷한 수준의 요구사항을 보장해야 하며, 다음 표는 협력 자율주행 서비스에서 요구하는 성능을 보여줌. 협력 머뉴버링 및 협력 센싱은 100ms 이하의 지연

Use Case Type	*V2X Mode*	*End-to-End Latency*	*Reliability*	*Data Rate per Vehicle (kb/s)*	*Communication Range*
Cooperative awareness	V2V/V2I	100 ms	90–95%	5–96	Short to medium
Cooperative sensing	V2V/V2I	3 ms	>95%	5–25,000	Short
Cooperative maneuvers	V2V/V2I	<3–100 ms	>99%	10–5,000	Short to medium

[협력자율주행 서비스 요구사항[3]]

○ 그러므로, DCC 알고리즘을 설계할 때 V2X 서비스에서 요구하는 성능을 고려하여 개발을 수행해야 함.

(가)-②-2. DCC 알고리즘 평가를 위한 성능지표

○ DCC 알고리즘의 평가를 위해 여러 성능지표가 참고문헌에서 제안되었음. MAC 계층 메트릭, application 및 facilities 계층 메트릭 및 알고리즘 quality 메트릭으로 분류할 수 있음.

○ MAC 계층 메트릭이 무선 매체 사용에 대한 영향을 직접 평가하는 반면, application 및 facilities 계층 메트릭은 DCC 알고리즘이 다른 차량을 얼마나 잘 인지하는지에 대한 영향을 정량화함.

○ 마지막으로, quality 메트릭은 DCC 알고리즘이 목표에 얼마나 빨리 도달하는지와 채널 자원을 차량에 얼마나 잘 분배할 수 있는지에 중점을 둠. 아래 표는 성능 메트릭에 관한 간단한 개요를 나타냄.

○ 대부분의 MAC 계층 메트릭은 개별 최소화 또는 최대화를 목표로 하지 않음. 대신 메트릭 그룹 간의 tradeoff 관계로 표현됨.

○ 예를 들어, 네트워크 전체 메트릭으로서의 평균 CBR은 특정 레벨 아래로 유지되어야 하지만, 개별 노드의 전송 주기는 자신에 대한 정보를 이웃 노드들이 성공적으로 업데이트하기에 충분히 높아야 하며, 수신자는 근처의 다른 차량으로부터 많은 수의 메시지를 수신할 수 있어야 함.

○ 주기적으로 다른 차량으로부터 메시지를 수신하는 것이 바람직하며, 이는 업데이트 지연에 의해 표현됨. 해당 application, 주변 차량 및 먼 거리에 있는 차량의 업데이트 지연에 따라 성능이 다르게 나타날 수 있음. 따라서 상황을 종합적으로 판단하여 균형을 맞추는 것이 중요함.

○ Application 계층 메트릭은 특히 CAM (Cooperative Awareness Message) 또는 BSM (Basic Safety Message)에 의해 전송되는 데이터 사용과 관련하여 정의됨.

○ CAM은 위치정보를 전달하므로, 마지막으로 수신한 정보에서 얻은 인접 차량의 위치와 실제 위치 사이의 편차는 인접 차량이 채널에 액세스하여 위치정보를 충분하게 broadcast 할 수 있는지에 대해 영향을 받으며, 이는 성능 메트릭에도 영향을 미침.

○ Quality 메트릭은 주어진 시간 간격 동안 모든 차량에 대해 평균화된 awareness level로 정의됨. 이 메트릭은 application의 요구사항을 고려하고 통신에 대한 한계를 반영하는 데 적합함.

Metric	Definition
MAC layer metrics	
Average channel busy ratio (CBR)	주어진 시간 간격 안에서 모든 차량의 평균 CBR
Frame collision rate	중복 프레임 전송으로 인한 수신기 오류율
MAC layer delay	메시지가 송신기의 MAC 계층에서 전송되어, 수신기의 MAC 계층에서 수신할 때까지 걸리는 시간
Reception rate	1초 내에 단일 노드에서 수신한 패킷 수
Packet inter-arrival time or update delay	동일한 차량으로부터 받은 연속된 메시지 사이의 시간
Transmit rate	특정 시간 간격 내에 주어진 송신 기회
Application and facilities layer metric	
End-to-end latency	Application 또는 facility 계층에서 메시지 생성부터 수신까지의 시간
Awareness quality	메시지가 수신되고 있지만, 완전히 수신 받지 못한 차량의 비율
Position error	마지막으로 수신한 차량의 전송 위치 데이터와 실제 위치의 평균 편차
Quality metric	
Convergence	특정 시작 조건이 주어지면 각 차량의 자원 할당이 특정 간격 내에 유지될 때까지의 시간
(Max-min-)Fairness	주어진 시간 간격 내에서 모든 차량의 채널 엑세스 기회 수의 최대 값과 최소값 간의 비율 또는 전송 시간

[DCC 성능 메트릭[1]]

(나) V2X 네트웍 분산혼잡제어 기술 분석 및 분산혼잡 제어를 위한 파라메터 도출

(나)-① 기본적인 DCC 및 분산혼잡 제어 파라메터 도출

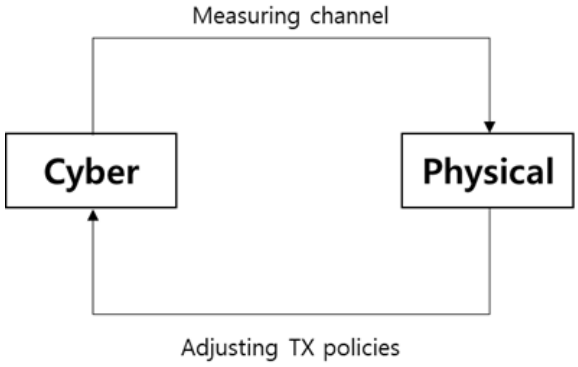
○ DCC는 다양한 방식으로 설계될 수 있지만, 일반적인 아이디어는 네트워크의 모든 차량이 전체 채널 혼잡을 회피하기 위해 채널 부하를 측정하고 자체적으로 채널 활용을 제한한다는 것임.

○ 기본적인 DCC 방식은 일반적으로 차량이 채널 부하를 나타내는 전체 채널 자원의 사용률을 개별적으로 측정하고 자원할당에 대한 제한을 설정함.

○ DCC는 그림 1과 같은 Cyber Physical System (CPS)으로 볼 수 있는데, 여기서 통신 파라메터 설정은 측정된 채널 상태의 피드백 루프(feedback loop)를 기반으로 최적화됨.

○ 각 차량의 물리적 블록은 Channel Busy Ratio (CBR)와 같은 메트릭(metric)을 통해 Channel Load (CL) 상태를 지속적으로 감지함.

○ 물리 블록의 감지 메트릭을 기반으로, 사이버 블록의 제어 알고리즘은 Transmission rate, TX power, Modulation scheme 또는 물리적 블록의 메트릭에 영향을 미치는 임의의 통신 매개변수를 조정하여 차량 밀도 증가에 의한 채널 혼잡을 제어함.



[Cyber-Physical System로써의 DCC[4]]

(나)-①-1. 입력 파라메터

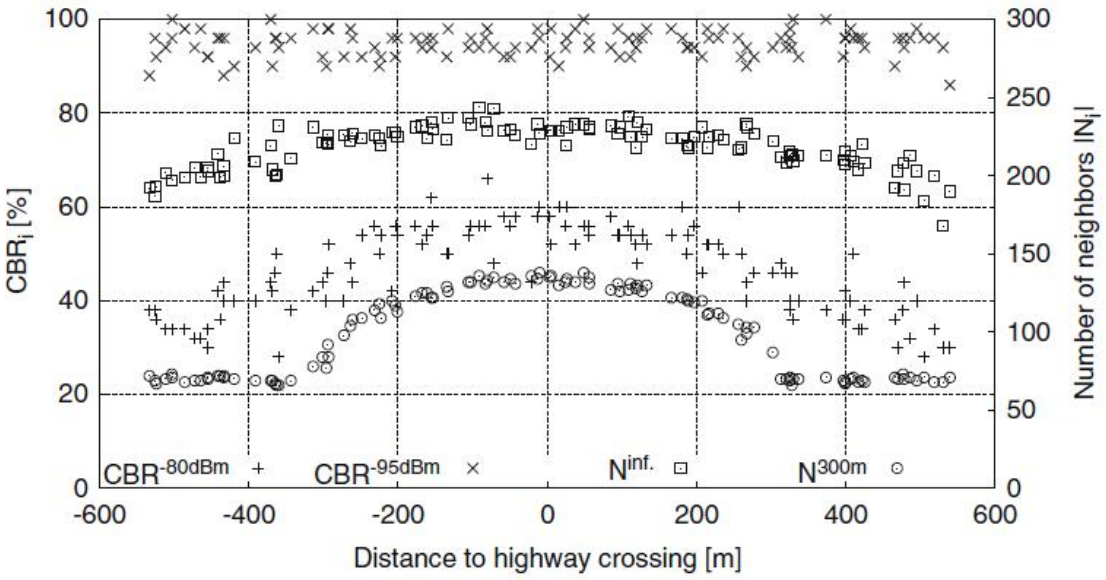
○ 채널 부하는 채널이 사용 중으로 인식되는 시간과 전체 관측 시간의 비율인 CBR로 특징지을 수 있음.

○ 높은 채널 부하는 주변의 많은 수의 차량 또는 높은 전송 속도에 의해 발생하며 둘 모두의 결과일 수 있음. 따라서, CBR과 주변의 차량 수는 DCC에 중요한 입력사항임.

○ 주변 차량의 간섭 영향은 거리에 따라 다르므로 일정 거리 이내의 차량만 고려해야 함. 마찬가지로 CBR 임계값은 합리적인 값으로 설정해야 하며, CBR을 결정하기 위한 임계값은 채널이 사용 중으로 인식되는지를 결정하는 RX 파워 레벨임.

○ 임계값이 낮으면, 먼 거리의 송신기로부터 수신되는 신호 레벨이 추가되어 CBR은 더 큰 값을 형성하게 됨.

○ 다음 그림은 트랙픽이 밀집된 다중 차선 고속도로 교차로 시뮬레이션 결과를 보여줌. 두 개의 CBR 임계값 -80과 -95dBm을 CBR을 계산하기 위한 기준으로 설정하고 이웃한 전체 차량의 수 $N^{\inf.}$와 300m 이내의 차량만 포함한 필터링된 집합 N^{300m}을 고려함.



[Input 파라메터에 따른 CBR값 변화[1]]

○ CBR^{-95dBm}은 항상 높은 채널 부하를 나타냄. 대조적으로, CBR^{-80dBm}의 경우 낮은 채널 부하를 감지함. 따라서, 고 부하를 감지하기 위해서는 임계값이 높은 CBR이 더 적합함.

○ 그러나 더 낮은 임계값은 채널 부하가 높지 않은 상황에서 이를 감지하는데 더 높은 정확도를 제공함. 높고 낮은 채널 부하에서 변화를 감지할 수 있으려면 다양한 CBR 임계값을 관찰하는 것이 필요함.

○ 주변 차량의 수에 관한 결과 비교는 CBR 결과와 매우 유사함. $N^{inf.}$ 의 경우, 차량 밀도가 180에서 230으로 약간 증가하며, 필터링된 세트 N^{300m}은 밀도가 70에서 140으로 더 명확하게 증가함을 보여줌. 따라서 짧은 이동 거리 내에서, 차량은 교통 상황이 크게 변했음을 감지할 수 있음.

○ 따라서, CBR과 주변의 차량 수는 채널 부하를 측정하고 상태를 분류하기에 적합함을 알 수 있음.

(나)-①-2. 출력 파라메터

○ DCC 알고리즘의 출력 파라메터 또는 리턴 파라메터는 전송 동작에 영향을 주는 요소임. 주로 transmission rate이 이에 해당하며, DCC에 의해 결정된 transmission rate은 메시지 전송을 트리거하는 데 직접 사용되거나 메시지 전송 주기의 상한으로 사용될 수 있음.

○ 두 번째로 중요한 출력 매개 변수는 Tx power이며, Tx power level의 감소는 채널의 공간 활용을 감소시킴.

○ 그러나, 이러한 Tx power 조절은 주의해서 사용해야 함. 두 대의 차량이 다른 Tx power로 송신하는 경우, 채널 자원의 공정한 분배를 보장할 수 없으며 심각한 숨겨진 노드 문제가 발생할 수 있음.

○ 그러므로, 전력 제어는 차량 간의 멀티 홉 정보 교환과 함께 진행되어야 할 필요성이 존재함.

○ Transmission rate은 주어진 기간 동안 허용되는 최대 전송 횟수를 설정하여 채널의 시간적 활용을 제한하는 반면, Tx power 제어는 공간적으로 채널 활용을 제한하여 무선 자원의 공간 재사용을 최적화함.

○ 다른 출력 파라메터는 rx sensitivity와 변조 및 코딩 방식(modulation and coding scheme)이 있으며, 첫 번째는 채널을 감지하는 감도를 조정하고, 후자는 프레임의 전송 시간과 SINR에 영향을 줌.

○ C-V2X 표준에서는 상황에 따라 네 개의 파라메터를 조절할 수 있도록 정의함. 따라서 DCC의 출력 파라메터는

네 개의 파라메터 범주에 맞게 지정할 수 있음.

(나)-② 기본적인 DCC 및 분산혼잡 제어 파라메터 도출

○ DCC에 대하여 광범위하게 연구가 진행되었으며 혼잡 제어 및 자원할당을 위한 많은 프로토콜이 제안되었음.

○ 주로 무선 LAN 기반의 IEEE 802.11p에 관한 연구가 진행되었으며, 유럽의 ESTI와 미국의 SAE에서 여러 DCC 프로토콜에 대한 표준화가 완성됨.

○ 대부분의 연구는 메시지 Transmission rate 및 Tx power 등의 파라메터 최적화에 중점을 두고 있으며 몇몇 연구는 혼잡 제어를 위해 다수의 제어 파라메터를 결합하는 방식을 제안하였음.

○ 무선 LAN 기반의 IEEE 802.11p에서, 대표적인 알고리즘으로는 ESTI에서 지정한 reactive dynamic DCC 알고리즘[5]과 adaptive DCC 알고리즘인 LIMERIC 알고리즘[6]이 존재함.

○ 셀룰러 기반의 C-V2X의 표준에서는 차량 밀도 증가에 의한 혼잡을 제어할 수 있도록 DCC 알고리즘에 대한 가능한 매커니즘을 구성하였지만, 구체적으로 운용할 분산혼잡제어 알고리즘과 파라메터들에 대해 명시하지 않고 있음.

○ 최근, 플로리다 대학의 CREAT 연구진에서 IEEE 802.11p의 DCC 알고리즘을 C-V2X 구조에 적합하게 변형하여 적용한 adaptive DCC 알고리즘[7]을 제안함.

(나)-②-1. Reactive Dynamic DCC 알고리즘

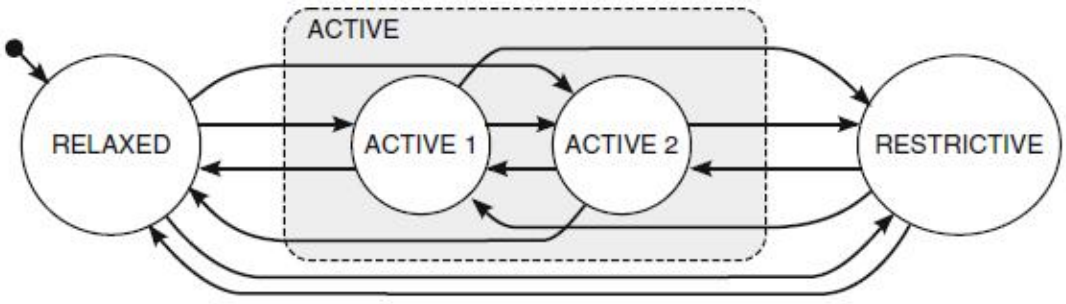
○ Reactive Dynamic DCC 알고리즘은 출력이 입력 파라메터에 의존하는 방식임. Reactive 알고리즘은 입력값(일반적으로 CBR)을 사용하여 출력값을 직접 결정함. 출력값은 수식 또는 룩업 테이블(lookup table)에 의한 결과임.

○ DCC의 첫 번째 ETSI 표준인 reactive dynamic 알고리즘은, 기본적으로 RELAXED, ACTIVE 및 RESTRICTIVE라는 3가지 state가 있는 state 머신을 기반으로 함.

○ RELAXED 상태에서는 DCC가 전송 주기나 출력 전력에 제한을 두지 않지만, ACTIVE 상태에서는 전송 주기가 적당히 제한되는 반면 RESTRICTIVE 상태에서는 정의된 최저 전송 전력과 최저 전송 주기만 허용됨.

○ 각 상태마다 채널 부하에 대한 임계값이 정의되어 있으며, 채널 부하가 특정 기간 동안 임계값을 초과하면, state 머신은 해당하는 state로 전환되고 해당 state에서 정의한 전송 주기 또는 전력에 대한 제약이 활성화됨.

○ ACTIVE 상태는 CBR과 전송 주기 사이에 세분화된 여러 하위 상태를 포함할 수 있음.



[DCC State machine[1]]

○ 각 state에서 다른 state로의 전이가 있고, 전이는 대상 state에 대한 임계값에만 의존하기 때문에 state 머신의 정의는 실제로 더 이상 사용되지 않음.

○ 대신, CBR 임계값 셋(set)에 따라 사전 정의된 전송 주기 $r(t)$의 선택은 다음과 같이 지정될 수 있음.

$$r(t) = \begin{cases} r_{\text{RESTR.}} & \text{if} \quad \text{CBR}(t') > \text{CBR}_{\text{RESTRICT.}} \quad \text{for all } t' \in [t-\Delta, t) \\ r_{\text{ACTIVE 2}} & \text{if CBR}_{\text{RESTRICT.}} \geq \text{CBR}(t') > \text{CBR}_{\text{ACTIVE 2}} \quad \text{for all } t' \in [t-\Delta, t) \\ r_{\text{ACTIVE 1}} & \text{if CBR}_{\text{ACTIVE 2}} \geq \text{CBR}(t') > \text{CBR}_{\text{ACTIVE 1}} \quad \text{for all } t' \in [t-\Delta, t) \\ r_{\text{RELAXED}} & \text{otherwise.} \end{cases}$$

○ 이 정의에는 전송 속도 r만 포함됨. 표준에서는 출력 전력 레벨, 변조 및 코딩 방식뿐만 아니라 상태 및 액세스 범주에 따른 수신기 감도에 대한 파라미터도 정의함.

○ 더욱이, 임계값을 초과하거나 아래로 떨어지는 경우, 상기 정의에서 단일 지속 기간 △ 대신에 2개의 다른 지속 기간이 정의됨.

○ 이 표준은 추가적인 활성 서브 state에 의해 state 머신을 확장할 수 있음. 이러한 방식으로, 인지된 채널 부하와 전송 제한 사이의 관계는 보다 세분화된 방식으로 모델링 될 수 있음.

○ 예를 들어, 몇몇 활성 서브-state는 CBR에 비례하는 전송 간격을 설정하는 단계별 함수를 정의할 수 있음.

○ 그러나 모든 차량 밀도에 최적화된 단일 노드의 전송 주기와 채널 부하 사이의 직접적인 관계를 정의 할 수는 없음.

(나)-②-2. Adaptive DCC 알고리즘 - LIMERIC

○ LIMERIC은 주변의 각 차량에서 독립적으로 실행되는 분산 알고리즘임. 시간 t에서 j번째 차량의 메시지 주기를 $r_j(t)$라고 하고, 시간 t에서 측정된 CBR 값을 CBR(t)라고 하면, 각 업데이트 간격에서 LIMERIC은 다음 수식에 따라 메시지 주기를 조정함.

$$r_j(t+1) = (1-\alpha) r_j(t) + \beta \left(\text{CBR}_{\text{target}} - \text{CBR}(t) \right).$$

○ α와 β는 안정성(stability)과 적응 속도(adaptation speed)에 영향을 미치는 알고리즘 파라메터임. β는 디폴트 패킷 지속 시간 d_{def}와 관련이 있음.

○ 이와 다른 패킷 지속 시간 d가 사용되는 경우, 동일한 제어 동작을 달성하기 위해 d_{def}/d로 β를 조정해야 함.

○ 주어진 영역에서 CBR을 감지하고 적응하는 LIMERIC 스테이션의 수를 나타내는 K를 사용하고 패킷 충돌이 없다고 가정하면 CBR은 다음과 같이 모델링 될 수 있음.

$$\text{CBR}(t) = d \sum_{j=1}^{K} r_j(t).$$

○ 동일한 메시지 주기 r_j에 대해, 위 식은 $CBR(t) = dKr_j(t)$로 단순화됨. $r_j(t+1) = r_j(t) = r_j$ 가정하에, CBR은 steady state로 수렴함.

$$\mathrm{CBR} = \frac{dK\beta}{(\alpha + dK\beta)}\mathrm{CBR}_{\mathrm{target}}.$$

○ LIMERIC은 공정한 방식으로 채널 자원을 할당하므로 차량들의 메시지 주기는 동일한 메시지 주기 r_j로 수렴함.

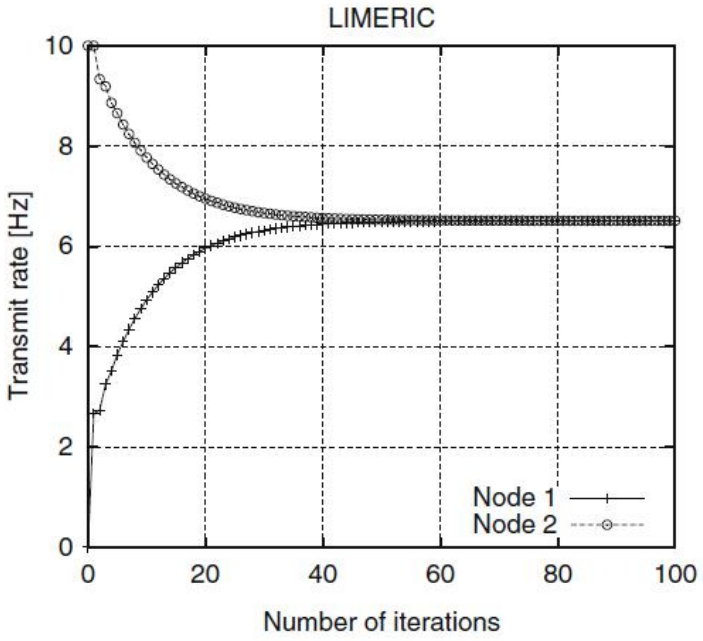
○ K의 이상적인 작동 범위에 대한 stability 조건을 만족시키는 것은 α 및 β의 선택에 있어 핵심적인 고려사항 중 하나임.

○ K가 예기치 않게 커서 inequality가 충족되지 않더라도, LIMERIC은 각 업데이트에서 β 항의 크기를 제한하여 안정성을 보장하는 gain saturation feature를 사용함.

○ LIMERIC의 수렴(convergence) 및 공정성(fairness) 속성은 아래 그림에 나와 있으며, 180개의 노드 중 두 노드에 대한 시간별 메시지 주기를 나타냄.

○ 시뮬레이션에서 180개의 노드는 4개의 그룹으로 나뉘며 각 그룹의 초기 메시지 주기는 각각 0, 2, 7 및 10 messages/s로 설정됨.

○ 노드 1 및 노드 2는 최고 및 최저 주기의 초기 조건 그룹에 속함. 메시지 주기는 초기 메시지 주기와 독립적으로 같은 값으로 수렴함. 보다 실용적인 LIMERIC 구현에서 CBR 측정의 부정확성으로 인해 메시지 주기가 약간 무작위로 변할 수 있음.



[LIMERIC의 수렴 및 공정성[1]]

○ 동기화된 업데이트를 위한 LIMERIC 알고리즘의 수렴은 다음과 같이 표시될 수 있음. $u_i = r_i \cdot d$를 메시지 주기 r_i와 패킷 지속 시간 d로 구성되는 노드 i의 개별 채널 부하로 정의하고, $CBR(t)$를 모든 노드의 전체 채널 부하로 가정하면 앞서 식에서 전체 부하는 다음과 같이 결정됨.

$$
\begin{aligned}
\mathrm{CBR}(t) &= d\sum_{i=1}^{K}\left((1-\alpha)r_i(t-1)+\beta(\mathrm{CBR}_{\mathrm{target}}-\mathrm{CBR}(t-1))\right)\\
&= (1-\alpha)\mathrm{CBR}(t-1)+dK\beta\cdot\mathrm{CBR}_{\mathrm{target}}-dK\beta\cdot\mathrm{CBR}(t-1)\\
&= (1-\alpha-dK\beta)\mathrm{CBR}(t-1)+dK\beta\cdot\mathrm{CBR}_{\mathrm{target}}\\
&= (1-\alpha-dK\beta)^2\mathrm{CBR}(t-2)+dK\beta\cdot\mathrm{CBR}_{\mathrm{target}}\left((1-\alpha-dK\beta)+1\right)\\
&= (1-\alpha-dK\beta)^t\mathrm{CBR}(0)+dK\beta\cdot\mathrm{CBR}_{\mathrm{target}}\sum_{i=0}^{t-1}(1-\alpha-dK\beta)^i
\end{aligned}
$$

○ 초기 부하 $CBR(0)$의 수렴은 $\lim_{t\to\infty} CBR(t)$로 표현할 수 있음. 위의 식에서 $|1-\alpha-dK\beta|<1$이면 limit가 존재함을 알 수 있음. 따라서 LIMERIC은 $\alpha+dK\beta<2$이면 stable함.

○ 위 조건에서, $(1-\alpha-dK\beta)^t CBR(0)$은 0 이되고, 나머지 부분은 아래와 같이 표현됨.

$$
\lim_{t\to\infty}\mathrm{CBR}(t) = 0 + dK\beta\cdot\mathrm{CBR}_{\mathrm{target}}\frac{1}{1-(1-\alpha-dK\beta)} = \mathrm{CBR}_{\mathrm{target}}\frac{dK\beta}{\alpha+dK\beta}
$$

○ 따라서 LIMERIC은 $CBR_{target}\cdot dK\beta/(\alpha+dK\beta)$로 수렴하므로 $0<\alpha+dK\beta<2$의 조건이 필요함. $\alpha=0.1, \beta=1/(150\mathrm{ms})$이고, $d=1\mathrm{ms}$ 일 때 $K<285$의 경우에 대하여 수식은 $1/(1+15/K)$로 수렴함.

○ LIMERIC은 CBR이 원하는 한계를 초과하지 않도록 메시지 주기를 조정하는 분산 적응 제어 알고리즘이라고 할 수 있음.

(나)-②-3. DCC-enabled C-V2X

○ 플로리다 대학에서 수행한 C-V2X DCC 알고리즘에 대한 주요 연구는 하위 계층에서 DSRC와 C-V2X의 근본적인 차이를 고려하여 DSRC 기반의 DCC 알고리즘을 C-V2X 스택으로 포팅 할 수 있는지를 평가하는 것임.

○ 따라서, DCC-enabled C-V2X를 위한 하이브리드 설계를 제안하였고, 네트워크 시뮬레이터를 사용하여 네트워크 부하가 많은 고밀도 차량 시나리오에서 성능을 평가하였음.

○ 응용 계층 관점에서, 일반적인 CVS(Cooperative Vehicle Safety) 시스템에서의 메시지 전송은 주로 메시지 broadcast 주기 r 및 broadcast 메시지의 범위 d의 두 가지 파라미터에 의해 좌우될 수 있음.

○ DCC의 주요 목적은 VANET이 높은 네트워크 부하에서 지속적인 패킷 충돌을 경험할 때 과도한 패킷 손실을 완화하여 완전히 비효율적인 네트워크로 이어지는 것을 막는 것임.

○ 이러한 문제는 차량의 통신 범위를 제한하는 것, 즉 방사 전력을 줄이거나 메시지 전송 주기를 줄임으로써 방지할 수 있음.

○ 그러므로, DCC-enabled C-V2X는 DSRC 기반의 transmission rate 알고리즘과 transmission range control 알고리즘을 사용하여 설계됨. 사용된 두 알고리즘은 다음과 같음.

- transmission rate control 알고리즘 :

$$\mathrm{ITT} = \begin{cases} 100\,\mathrm{ms}, & N_{STA}^{S} \le \mathcal{B} \\ \frac{N_{STA}^{S}}{\mathcal{B}} \times 100\,\mathrm{ms}, & \mathcal{B} < N_{STA}^{S} < \frac{\mathrm{ITT}^{\max}}{100\mathrm{ms}}\mathcal{B} \\ \mathrm{ITT}^{\max}, & \frac{\mathrm{ITT}^{\max}}{100\mathrm{ms}}\mathcal{B} \le N_{STA}^{S}. \end{cases}$$

- ✓ Rate control 알고리즘은 측정된 차량 밀도의 proximity인 N_{STA}를 기반으로 전송 주기 ITT(Inter Transmit Time)을 결정함. β는 밀도 계수, ITTmax는 허용되는 최대 전송 시간임.
- ✓ CVS 시스템은 위 식으로부터 계산된 ITT에 기초하여 주기적으로 메시지를 전송함. 또한 VANET에서 혼잡 제어의 궁극적 목적은 안전 요구사항을 유지하는 것이므로 DCC는 상위 계층 안전 응용 프로그램의 피드백도 필요함

- transmission range control 알고리즘 :

$$P_{k+1} = P_k + \eta \times (g(CBR) - P_k)$$

$$g(CBR) = \begin{cases} P_{\max}, & CBR < U_{\min} \\ P_{\min} + (\frac{U_{\max} - CBR}{U_{\max} - U_{\min}}) \times (P_{\max} - P_{\min}), & U_{\min} \le CBR < U_{\max} \\ P_{\min}, & U_{\max} \le CBR. \end{cases}$$

- ✓ Transmission range control 알고리즘은 차량들이 스스로 통신 범위를 제어하고 채널 사용률 (CBR)에 기초하여 과도한 패킷 충돌을 회피함.
- ✓ Range control 알고리즘은 CBR을 혼잡 상황에 맞는 TX power에 매핑하는 개념임.
- ✓ 위 수식에서는 방사 전력을 통제함으로써 [Umin Umax]의 범위에서 CBR를 유지함. 여기서 전력의 최종 설정값 P_k는 새로운 방사 전력 값 P_{k+1}을 계산하는 데 사용됨.

○ 앞서 설명한 두 알고리즘은 DSRC 통신을 위해 설계되었으므로, C-V2X 네트웍에서 작동할 수 있도록 수정이 필요함.

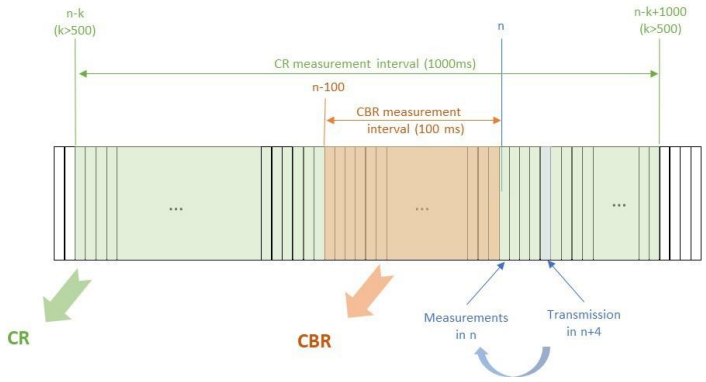
○ 3GPP 표준에서는 구체적인 혼잡제어 알고리즘을 명시하진 않지만, CR(Channel-occupancy Ratio)에 기반한 프레임 웍을 제안하였음.

○ 따라서, 언급한 알고리즘을 3GPP에서 제안한 프레임 웍에서 동작할 수 있도록 DCC-enabled C-V2X를 설계함.

○ IEEE 802.11p와 달리 C-V2X에서는 무선 자원을 시간과 주파수로 나눔. 따라서 3GPP는 다음과 같이 CBR과 CR을 정의함.

○ CBR (Channel Busy Ratio) : S-RSSI 값이 미리 설정된 임계값을 초과하는 리소스 풀의 subchannel 비율로 정의됨. 이러한 메트릭은 n을 기준으로 마지막 100개의 서브 프레임에서 감지되며, 채널의 전체 상태를 추정함.

○ CR (Channel-occupancy Ratio) : 서브 프레임 n에서 계산되며 [n-a, n-1]에서 전송에 사용된 subchannel의 총 수와 [n, n + b]에서 예약된 subchannel의 총 수의 합을 [n-a, n + b] 내의 총 subchannel 수로 나눈 값으로 정의함. a 및 b는 a + b + 1 = 1000, a ≥500의 제한을 두며 각 차량에 의해 개별적으로 결정됨. CR은 송신기 자체에 의해 평가되며 채널 이용에 대한 지표를 제공함.



[DCC 메커니즘에서의 CBR과 CR[8]]

○ CBR은 UE의 proximity인 N_{STA}에서 이웃 노드의 수를 추정하는데 사용될 수 있음. 3GPP 표준은 미리 설정된 CBR 임계값을 유지하기 위해 CBR를 사용하여 N_{STA}를 추정하고 CR을 제한하는 매핑 기능을 제안함.

○ 아래 식은 UE가 자신의 전송을 위해 이용할 수 있는 무선 자원에 대한 한계 값인 CRlimit를 도출하기 위해 설정된 로직임.

$$\text{if} : \text{CBR} > \text{CBR}_{\text{lim}}, \qquad then : CR_{\text{lim}} = \frac{CBR_{\text{lim}}}{f^{-1}(CBR)}$$

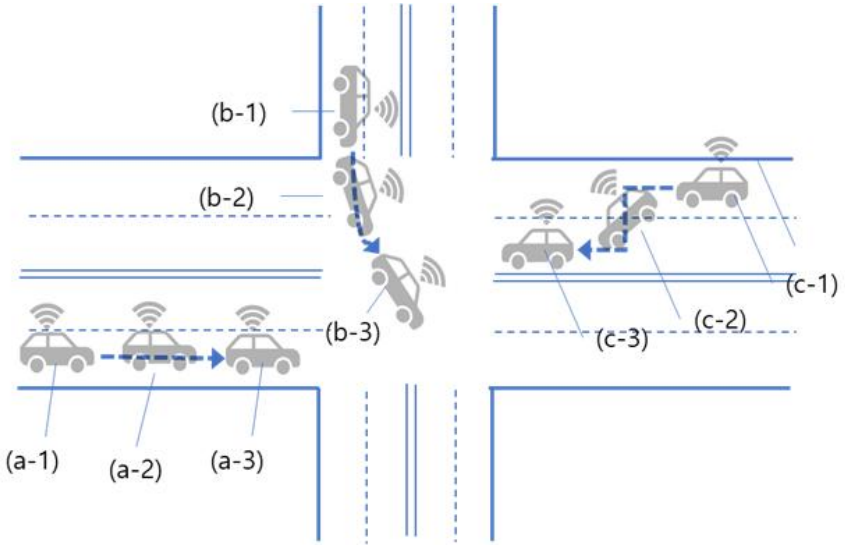
○ 여기서 CBR=f(N_{STA})는 주변 차량의 수를 추정하기 위한 매핑 함수이며 CBRlimit는 미리 설정된 CBR 임계값임.

○ DCC-enabled C-V2X는 3GPP에서 정의한 CBR과 CR값을 transmission rate와 range control 알고리즘에 적용하여 시뮬레이션을 수행함.

(다) V2X 네트웍 혼잡제어 신규 기술 아이디어 도출

(다)-① 차량 운행 상태를 이용한 분산혼잡 제어

○ 첫 번째 V2X 네트웍 혼잡제어기술은 차량의 운행상태 변화율에 따라 전송 주기와 전송 전력을 결정하는 방식임.



[차량의 운행상태 변화]

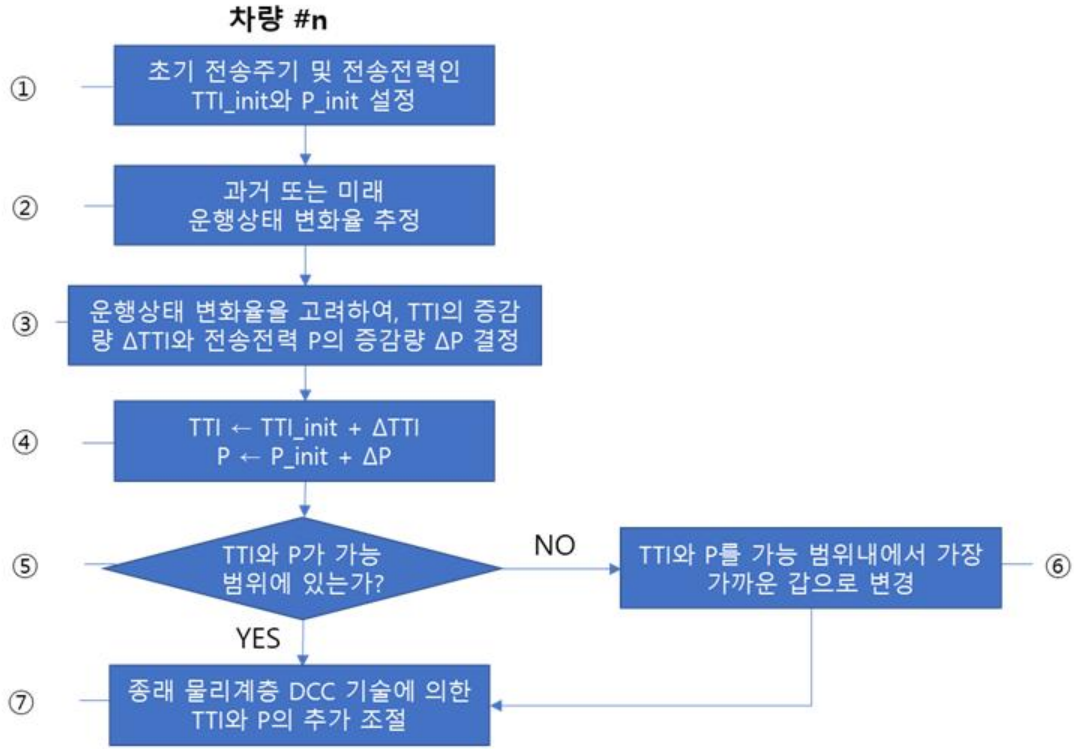
○ 그림을 참고하면, a 차량이 시간이 지남에 따라 전방으로 등속 진행한다고 할 때, 각 운행상태가 차량의 위치만 변화하고 속도, 가속도, 방향, yaw rate 면에서는 변화가 미미할 수 있음.

○ 따라서, 이러한 단위 시간 동안의 차량 운행상태 변화율이 낮은 경우에는, 충돌 회피를 위한 BSM(Basic Safety Message)과 협력 머뉴버링을 위한 메시지의 TTI를 증가시키더라도, 다른 차량이 해당 메시지의 운행상태정보를 이용하여 a 차량의 이동 경로를 예측하는 데 있어서 정확도를 감소시키지 않을 수 있음.

○ 반면에 교차로에서 좌회전하는 b 차량과 차선을 변경하는 c 차량의 경우에는, 단위 시간 동안 속도, 가속도, 방향, yaw rate의 변화율이 크기 때문에, BSM과 협력 머뉴버링 메시지에 대한 전송 주기를 증가시킬 경우, 다른 차량이 해당 메시지의 운행상태정보를 이용하여 b 차량과 c 차량의 이동 경로를 예측하는 데 있어서 정확도를 감소시킬 수 있음.

○ 위와 같이 차량의 운행상태 변화율을 고려하면, 운행상태 변화율이 낮은 차량의 경우 V2X 서비스의 성능에 주는 영향을 최소화하면서 메시지의 전송 주기를 증가시키고 전송 전력을 감소시켜 전체 채널 부하를 효과적으로 감소시킬 수 있음.

○ 각 차량이 자차의 과거 운행상태 변화율이나 미래 운전 의도에 따른 운행상태 변화를 추정하고, 이에 기반하여 전송 메시지의 전송주기 TTI와 전송전력 P를 조절하는 방법은 다음과 같음.



[차량 운행 상태를 이용한 분산혼잡 제어 흐름도]

①: 먼저, 초기 전송 주기 및 전송 전력인 TTI_init와 P_init를 설정함. 초기 설정 값은 일반적인 메시지의 전송 주기 및 전력으로 설정하며, TTI_init = 100ms, P_init = 23dB로 설정.

②: 그다음, 차량은 자차(ego vehicle)의 과거 운행상태변화율을 추정하며, 추정된 변화율은 C-ITS의 충돌 회피 서비스를 위한 BSM의 TTI와 P를 결정할 때 사용됨.

- ✓ 자율주행 차량의 경우 향후 운전 의도에 따른 자차의 미래 운행상태변화율을 추정함. 이를 이용하여 협력센싱과 협력 머뉴버링의 메시지의 TTI와 P를 결정할 수 있음. 운행상태는 위치, 속도, 가속도, 방향, yaw rate 등을 포함함.

③: ②에서 결정된 운행상태 변화율을 고려하여, TTI의 증가량 또는 감소량인 ⊿TTI와 전송전력 P의 증가 또는 감소량인 ⊿P를 결정함. 운행상태변화율이 증가할 경우에는 ⊿TTI 의 값을 음의 값으로 하고, 반대의 경우에는 양의 값으로 함.

- ✓ 또한, 자율주행 차량의 속도를 감소시킬 경우, ⊿P를 음의 값으로 하여 협력센싱과 협력머뉴버링의 메시지를 수신하는 타 차량들의 수를 감소시킬 수 있으며, 속도가 증가할 의도를 가지고 있을 경우에는 ⊿P를 양의 값으로 하여 메시지 수신 범위를 넓힐 수 있음.

④: ③에서 결정된 ⊿TTI와 ⊿P를 TTI_init과 P_init에 각각 더해주어 TTI와 P를 결정함.

⑤: ④에서 구해진 TTI와 P가 전송 가능한 범위 내에 있는 지를 판단함.

⑥: ④에서 구해진 TTI와 P가 가능한 범위 내에 있지 않을 경우, 가능한 범위 내에서 가장 비슷한 값을 찾아서 TTI와 P로를 결정함.

⑦: 마지막으로, 현재까지 결정된 TTI와 P는 채널 부하에 따라 메시지의 전송주기와 전송전력을 조절하는 기존 물리계층 DCC 기술에 의해 추가 조절될 수 있음.

(다)-② V2X 서비스의 QoS를 이용한 분산혼잡 제어

○ 두 번째, V2X 네트웍 혼잡제어기술은 V2X 서비스를 위한 QoS에 따라 전송 주기와 전송 전력을 경정하는 분산혼잡 제어 방법임.

서비스	메시지	전송 주기	전송 거리	전송 주기와 거리 조절
충돌회피지원 서비스	BSM	100ms~1s	~ 1000m	전송주기와 거리 조절 필요
교차로통행지원서비스	SPaT, MAP	100ms~1s	~ 1000m	전송 주기와 거리 조절 불필요
협력센싱 서비스	미정	3ms~	근접 거리	전송주기와 거리 조절 필요
협력 머뉴버링 서비스	미정	10ms~	근접 거리	전송주기와 거리 조절 필요
LDM 서비스	미정	100ms~	~ 1000m	전송 주기와 거리 조절 불필요

[서비스 별 전송주기 및 전송거리]

○ 위 표는 V2X 통신 서비스에 따른 전송 주기와 전송 범위 대한 예를 보여줌. C-ITS와 자율주행을 위한 V2X 서비스를 위해 서로 다른 메시지가 필요하고, 각 메시지가 전송되어야 할 최소 주기와 최대 전송 거리도 매우 상이함을 알 수 있음.

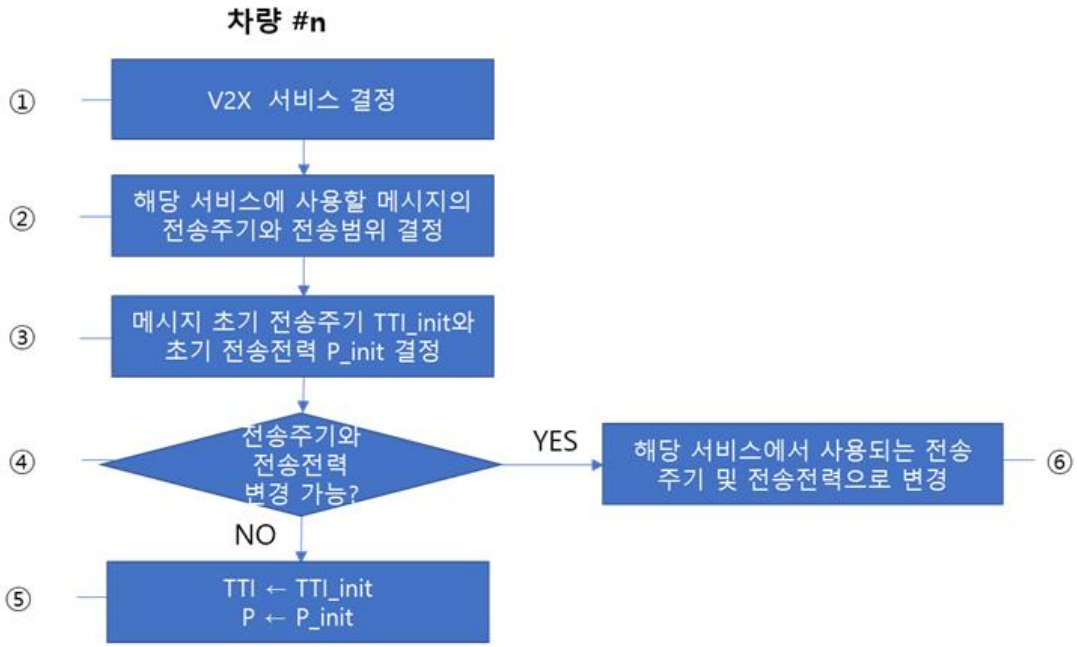
○ 따라서, 채널 부하가 과다한 상태이더라도, 각 V2X 서비스의 QoS에 따라 전송주기와 전송전력을 차별적으로 증가 또는 감소시켜야 함.

○ 교차로 통행 지원서비스에서 사용하는 SPaT(Signal Phase and Time)와 MAP(Map Data) 메시지의 경우에는, RSU에서 메시지를 차량들에게 브로드캐스팅하는 메시지로, 채널 부하가 과다한 상황에서도 전송 범위와 주기를 변화시킬 수 없는 서비스임.

○ 또한, 자율주행을 위한 LDM(Local Dynamic Map) 서비스에 대한 메시지 표준화는 진행 중이며, 도로상의 동적 객체 정보를 RSU에서 차량들에게 브로드캐스팅하는 서비스로, 채널 부하가 과다한 상황에서도 전송 범위와 주기를 변화시킬 수 없는 서비스임.

○ 반면에, 각 차량에서 센싱한 주변 상황에 대한 인지 정보는 주변의 다른 차량과 공유하는 협력 센싱(Cooperative Sensing) 서비스와 각 차량의 주행 의도에 따른 궤적 정보(intent trajectory)를 주변의 차량들에게 전달하는 협력 머뉴버링(Cooperative Manenvering) 서비스는, 차량의 운행상태에 따라 각 서비스의 질을 악화시키지 않으면서 관련 메시지의 전송주기와 전송 전력을 효과적으로 조절할 수 있음.

○ 각 차량에서 수행하고자 하는 V2X 서비스에서 요구되는 QoS를 식별하고, 해당 서비스에서 사용되는 메시지의 필요 전송률과 전송 전력을 결정하는 방법과 장치는 다음과 같다.



[V2X 서비스의 QoS를 이용한 분산혼잡 제어 흐름도]

①: 차량은 자차(ego vehicle)이 수행할 V2X 서비스를 결정함.

②: ①에서 수행할 V2X 서비스에서 사용될 메시지와 해당 메시지의 전송 주기 및 전송 범위를 식별함.

- ✓ 위의 표와 같이 각 서비스 별로 미리 정의된 요구 QoS 값들을 이용할 수 있음. 또는 시스템에서 각 서비스별로 요구 QoS 정하고, 이를 RSU를 통해 차량들에게 브로드캐스팅할수도 있음.

③: ②에서 결정된 전송 주기를 만족시키는 TTI (Transmit time interval) 구간에서 가장 최소 값을 초기 TTI인 TTI_init으로 결정함.

- ✓ 또한, ②에서 결정된 전송 가능 전력 범위에서 최대 전송전력을 초기 전송 전력인 P_init으로 결정함. 예를 들면, BSM의 경우 TTI_init=100ms 이고 P_init= 23dBm 이 됨. 이렇게 결정된 TTI_init과 P_init은 서비스 별로 매우 상이함.

④: 수행할 V2X 서비스가 전송전력과 전송주기를 변경할 수 있는지를 판단함. 앞서 설명한 표에서 충돌회피지원 서비스, 협력센싱 서비스, 협력 머뉴버링 서비스는 전송전력과 전송주기를 변경할 수 있으며, 교차로통행지원 서비스와 LDM 서비스는 변경할 수 없음.

⑤: ④에서 서비스는 전송전력과 전송주기를 변경할 수 없을 경우, TTI와 P는 각각 TTI_init과 P_init으로 결정됨. 이와 같은 과정을 통해서 V2X 서비스에 따른 상이한 QoS를 만족시키는 해당 메시지의 TTI와 P를 결정할 수 있음.

⑥: ⑤에서 전송전력과 전송주기를 변경할 수 있는 서비스의 경우에, 차량의 운행상태변화율에 따라 TTI와 P를 추가 조정하는, 첫 번째로 제안한 분산제어 알고리즘을 수행할 수 있음.

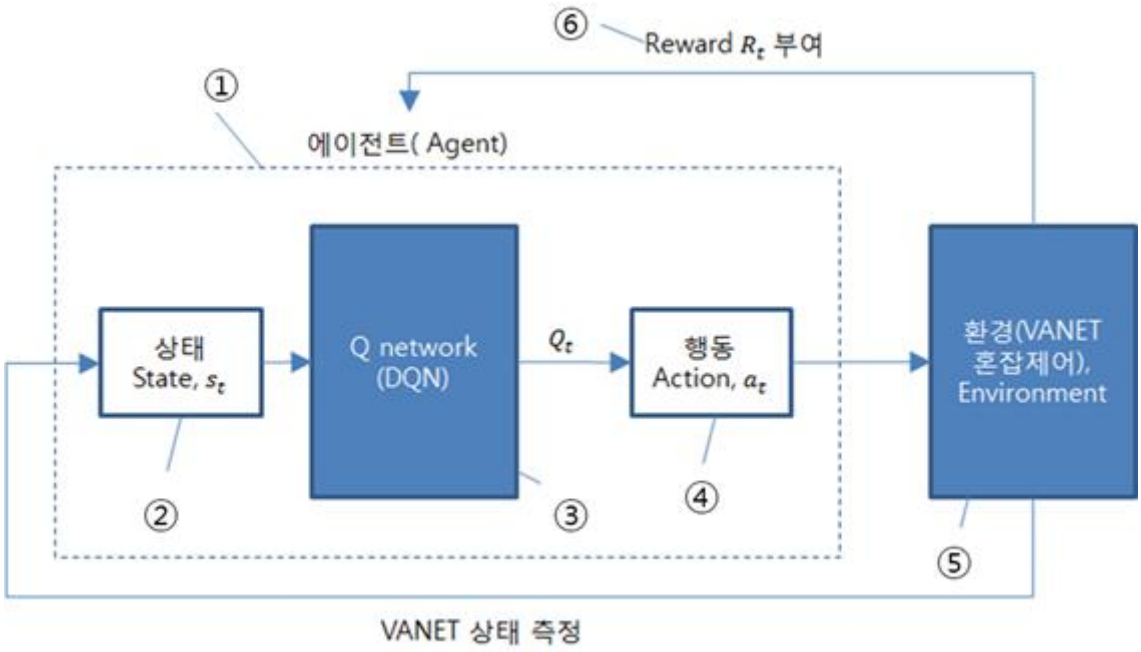
(다)-③ 강화학습 기반의 신경망을 이용한 분산혼잡 제어

○ 세 번째, V2X 네트웍 혼잡제어기술은 VANET(Vehicular Ad-hoc network)에서 다양한 도로 환경과 차량 운행 상태, 그리고 다양한 V2X 통신 서비스의 상이한 QoS를 고려하여, 차량 V2X 단말기 스스로 전파자원 할당을 최적으로 적응하는 분산혼잡제어 방법임.

○ 강화학습 기반의 분산혼잡제어 방법은 차량 V2X 단말에서 채널혼잡도 CBR을 추정하고, 현재 차량의 전파자원 점유율 CR, 이동속도, 송신 전력, 그리고 V2X 서비스 QoS을 추정함.

○ 채널혼잡도 CBR, 전파 자원 점유율 CR, 이동속도, 송신 전력, V2X 서비스 QoS를 입력으로 삼는 강화학습 기반의 신경망을 이용하여 해당 차량이 사용할 수 있는 전파자원 점유율의 최대치 CR limit과 송신전력 최대치 P limit를 결정하는 방식임.

○ 아래 그림은 강화학습 기반의 신경망을 이용한 VANET 분산혼잡제어 방법의 개요를 나타냄.



[강화학습 기반의 신경망을 이용한 분산혼잡제어 개념]

○ 에이전트(①)는 강화학습 기반의 신경망을 이용하여 환경의 상태(VANET의 혼잡도)에 따라 일련의 행동(전파자원 점유율과 송신전력을 결정)을 수행하는데, 보상을 통해 전송률과 지연시간에서 목표하는 성능을 달성하도록 함.

○ 먼저, 상태(②)는 추정한 채널혼잡도 CBR과 자차의 현재 전파 자원 점유율 CR, 이동속도 v, 송신 전력 P를 고려함.

○ Q network(③)는 강화학습 기반의 신경망으로 대표적인 DQN(Deep Q-network)을 사용할 수 있음. DQN은 Q-학습(learning) 기술에 인공신경망 기술을 추가하여 더 넓은 상태 공간상에서 강화 학습을 진행하는 알고리즘임.

○ 기존의 Q-학습 기술은 상태 공간이 한정된 경우에 각 상태에 대한 가치를 나타내는 Q 값을 저장하여 효과적으로 학습을 진행할 수 있었으나, CBR 뿐 아니라 자 차의 CR, 송신 전력, 속도와 같이 상태 공간이 증가하게 되면 매우 큰 수의 조합에 대한 Q 값을 저장해야 하므로 효율적이지 못함.

○ 이에 반해, DQN은 개별 Q 값을 저장하지 않고, Q 값을 결정하는 함수를 인공신경망으로 근사화하여 문제를

해결하는데, 인공신경망으로 근사화된 가치 네트워크에 현재 상태를 입력으로 주고 Q 값인 Q_t을 결과 값으로 추출함.

○ ④에서 행동 a_t를 결정하게 되는데, 에이전트가 취한 행동에 대해 환경(⑤)으로부터 받게 되는 두 가지 보상(즉각 보상과 미래 보상)을 최대로 받을 수 있도록 결정함.

○ 여기서, 즉각 보상은 에이전트가 취한 행동에 대해 발생하는 즉각적인 보상이고, 미래 보상은 행동으로 인해 나타나는 미래 환경에 대한 보상을 말함. 이는 다음 식과 같이 표현할 수 있음.

$$Q(s_t, a_t) \leftarrow Q(s_t, a_t) + \alpha_t(s_t, a_t)\left[\gamma_{t+1} + \gamma \max_a Q(s_{t+1}, a) - Q(s_t, a_t)\right]$$

○ 여기서 γ는 discount factor로 0에서 1사이의 값을 가지며 0에 가까우면 현재, 1에 가까울수록 미래에 대한 보상의 중요성을 강조하게 된다. a_t는 학습율로 0에서 1사이의 값을 가지며 Q 값의 학습율을 결정함.

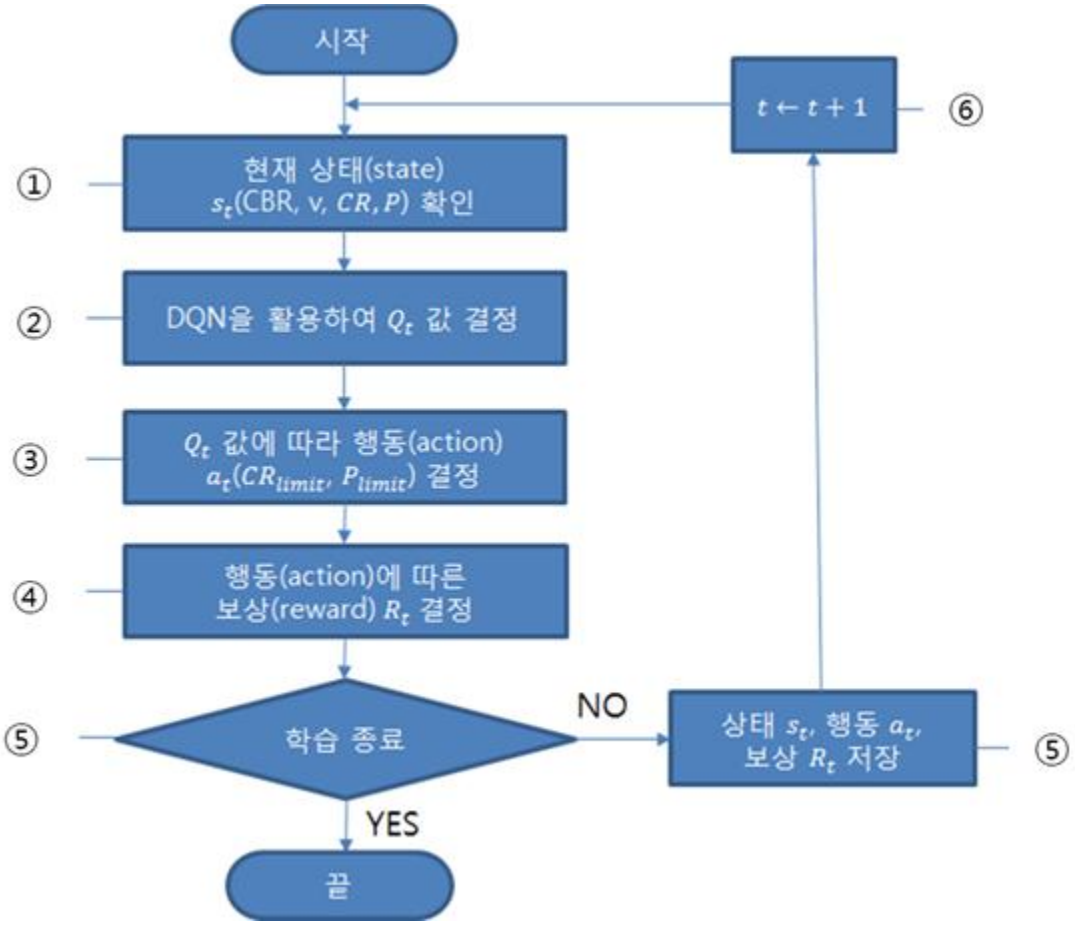
○ 보상(⑥)은 에이전트가 취한 행동에 대한 미래 보상 값으로 자 차가 사용하는 V2X 서비스의 QoS 달성도를 고려할 수 있음. 즉 자 차가 사용하는 V2X 서비스를 성공하기 위해 요구되는 전송률(throughput)과 시간 지연(latency)을 달성하고 있는지의 여부 또는 목표 값에 대한 현재 값의 달성도를 보상 값으로 부여함.

○ 전송률은 수신에 성공한 패킷에 대한 전송률인 PDR(packet delivery rate)로 측정할 수 있으며, 패킷 전송에 소요되는 시간 지연은 수신 성공한 패킷 간의 시간 간격인 IPG(Inter Packet Gap)으로 측정할 수 있음.

○ PDR과 IPG는 각 차량에서 순시적으로 측정할 수 없는 성능 평가 지표이므로 미래 보상 값으로 사용함.

○ DQN(③)는 뒤에서 설명할 기본적인 DQN을 훈련하는 절차에 따라 학습되게 됨. 에이전트는 DQN을 저장 장치의 저장된 행동과 보상을 이용하여 정기적인 훈련 기간마다 학습하고 DQN 네트워크를 업데이트 할 수 있음.

○ 또한 실제 환경에서 차량이 운행 중에 분산혼잡제어를 하면서 학습을 수행할 수 있다. 추가적으로 에이전트는 다양한 VANET 환경에 대해 사전에 학습을 하기 위해 일정한 가상환경 시뮬레이션 데이터나 실제 환경에서 수집된 데이터를 이용할 수 있음.



[Q 학습(Q-learning) 과정]

○ 위 그림은 제안하는 분산혼잡제어의 개념도에서 언급한 Q 학습(Q-learning) 과정에 대한 순서도임.

①: 먼저, 에이전트는 현재 상태 s_t(CBR, v, CR, P)를 확인함.

②: 과정에서 에이전트는 DQN을 이용하여 Q_t 값을 획득함.

③: 과정에서 에이전트는 Q_t 값에 따라 전파자원 점유율의 최대치 CR_{limit}과 송신전력 최대치 P_{limit}를 결정하는 행동 a_t(CR_{limit}, P_{limit})을 선택함.

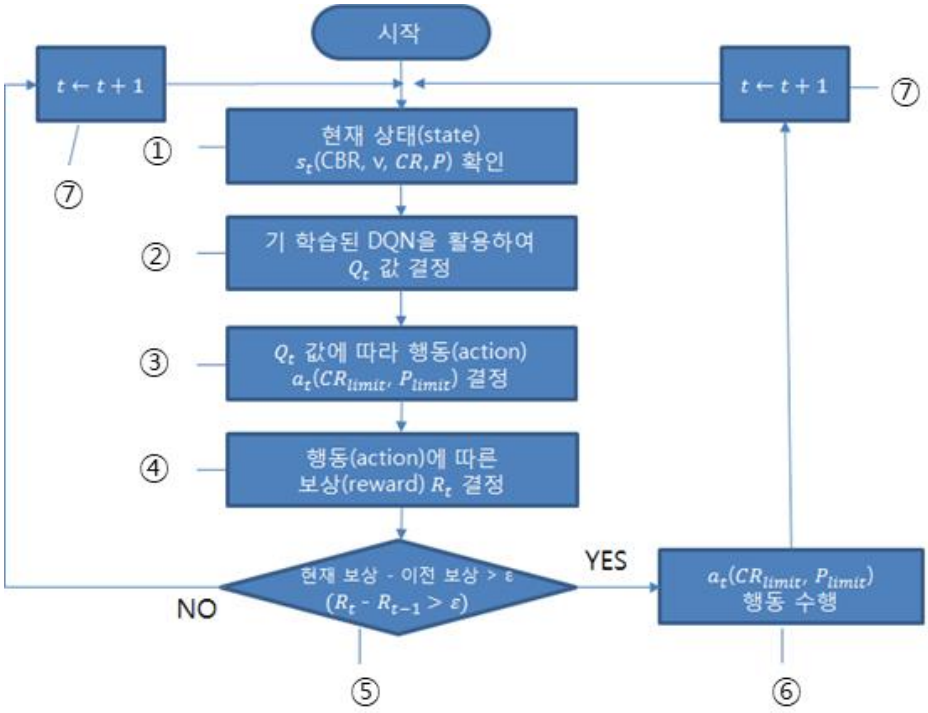
④: 과정에서 에이전트는 이후 행동 a_t(CR_{limit}, P_{limit})에 따른 보상 R_t를 관찰함.

⑤: 과정에서 학습이 종료되지 않았다면, 에이전트가 취한 행동에 대해 환경에서 에이전트는 자신의 현재 상태 s_t, 행동 a_t, 그리고 그에 따른 보상 R_t를 저장함.

⑥: 과정에서 다음 단계로 진행하며, 이 과정을 학습이 종료될 때까지 반복함.

- 이 과정을 통해 에이전트는 분산혼잡제어를 통해 각 차량의 전파자원 점유율의 최대치 CRlimit과 송신전력 최대치 Plimit를 결정하기 위한 DQN을 마련함.
- 에이전트는 실제 환경에서 분산혼잡제어를 하면서 학습을 수행할 수 있으며, 또한 사전에 학습을 하기 위해 실제 환경이나 가상환경 시뮬레이션을 통해 생성된 일정한 샘플 데이터를 이용하여 에이전트가 학습할 수 있음.

○ 아래 그림은 강화 학습을 통한 분산혼잡제어의 과정에 대한 예를 나타낸 것임.



[강화학습을 통한 분산혼잡제어 과정]

①: 에이전트는 현재 상태 s_t(CBR, v, CR, P)를 확인함.

②: 에이전트는 학습이 완료된 DQN을 이용하여 Q_t 값을 획득함.

③: 에이전트는 Q_t 값에 따라 전파자원 점유율의 최대치 CR_{limit}과 송신전력 최대치 P_{limit}를 결정하는 행동 a_t(CR_{limit}, P_{limit})을 선택함.

④: 에이전트는 이후 행동 a_t(CR_{limit}, P_{limit})에 따른 보상 Rt를 관찰함.

⑤: 에이전트는 현재 행동에 따른 보상 R_t가 직전의 보상 R_{t-1} 보다 일정한 임계값 ϵ 보다 큰지 판단한다. 이를 통해 에이전트는 클러스터링에 따라 목표하는 성능이 일정하게 개선되는지를 판단함.

⑥: 현재 보상이 직전의 보상보다 일정하게 크다면, 에이전트는 행동 a_t(CR_{limit}, P_{limit})에 따라 각 차량의 전파자원 점유율의 최대치 CR_{limit}과 송신전력 최대치 P_{limit}를 변경함.

⑦: 다음 단계로 진행하며, 이 과정을 분산혼잡제어가 종료될 때까지 반복함.

(라) 개발된 V2X 네트웍 분산혼잡제어 기술의 구현 및 성능 분석

(라)-① 개요

○ DCC와 관련하여 C-V2X는 충분히 연구되지 않았으며 표준도 논의 중임. 3GPP (3rd Generation Partnership Project)는 관련 메트릭, 채널 리소스 사용에 대한 제한 및 혼잡 제어에 사용되는 가능한 메커니즘만을 정의하며 특정 DCC 알고리즘을 제공하지는 않음.

○ 또한, DCC에는 혼잡 제어를 위한 많은 조정 가능한 매개변수가 있지만, 의도한 범위에서 채널 사용을 조정하면서 이러한 매개변수 간의 균형을 찾는 것은 매우 복잡함.

○ 따라서 C-V2X와 관련된 DCC 연구는 더욱 다양하게 진행되어야 하며 1차년도에 3가지 V2X 네트웍 혼잡제어 신규 기술에 대한 아이디어를 도출함.

○ 도출한 3가지 아이디어 중, 강화학습 기반의 신경망을 이용한 분산혼잡 제어는 다른 2가지 아이디어인 차량 운행 상태를 이용한 분산혼잡 제어 및 V2X 서비스의 QoS를 이용한 분산혼잡 제어를 포함할 수 있는 기술임.

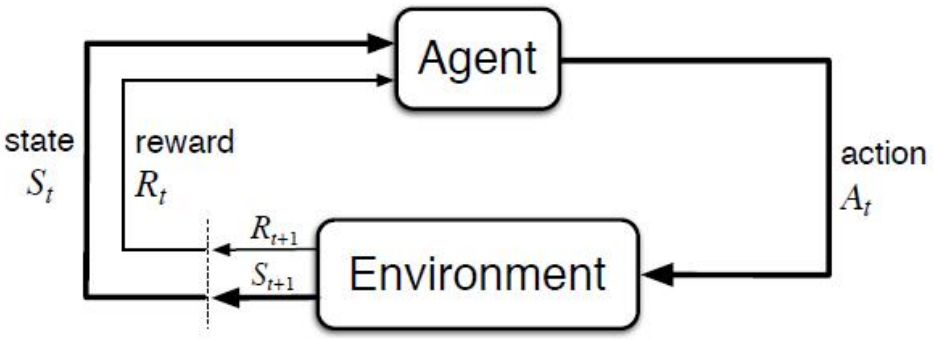
○ 심층 강화 학습(DRL, deep reinforcement learning)은 매우 빠르게 변화하는 분야이며 강화학습과 심층 신경망을 결합함. 광범위한 복잡한 의사 결정 문제 (decision-making problem)를 처리할 수 있기 때문에 오늘날 널리 사용되고 있는 기계 학습 유형임.

○ 따라서, 본 연구에서는 강화학습 기반의 신경망을 이용한 분산혼잡 제어를 시뮬레이터 상에 구현하고 기술에 대한 성능 분석을 수행함.

(라)-② 강화학습 기반의 신경망을 이용한 분산혼잡 제어

(라)-②-1. 강화학습 개념

○ 강화학습은 에이전트가 환경과의 상호작용을 통해 학습하는 방법이며 MDP (Markov Decision Problem)로 모델링 할 수 있음.



[강화학습의 기본 개념도[6]]

○ 시간 단계 t에서 에이전트는 환경에서 현재 상태 st를 관찰하여 행동 at를 수행함. 그런 다음 에이전트는 at에서 비롯되는 보상 rt를 얻고 다음 상태 st+1로 이동함.

○ 강화학습 알고리즘은 보상점수에 의해 행동을 평가하고, 에이전트는 누적 보상을 최대화할 수 있도록 훈련함. 에이전트는 이 프로세스를 반복하며 겪는 시행 착오(trial and error)를 통해 주어진 일을 학습함.

○ 다양한 강화학습 알고리즘 중에서, Q-러닝은 환경을 알지 못하는 상황에서 MDP 문제에 대한 최적의 정책(policy)을 학습하는 강화학습 방법임.

○ Q-러닝에서, 에이전트는 다음과 같이 정책 π에 따른 Q 함수 $Q\pi(s,a)$을 사용하여 예상 누적 보상을 최대화함.

$$Q_*(s,a) = \max_{\pi} Q_\pi(s,a)$$
$$= \max_{\pi} \mathbb{E}[\sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k r_{t+k} | s_t = s, a_t = a, \pi].$$

○ 여기서 Q*(s,a)는 최적의 Q-함수이며, γ은 미래 보상의 중요성을 정량화하는 요소인 discount factor임. 만약 최적의 Q-함수가 결정되면 최적의 정책은 다음과 같음.

$$\pi_*(s) = \underset{a \in \mathcal{A}}{\operatorname{argmax}} Q_*(s,a), \forall s \in \mathcal{S}$$

○ 여기서 $\mathcal{S}$와 $\mathcal{A}$는 각각 상태 및 행동 집합을 나타내며, 최종적으로 Q-러닝 알고리즘은 다음 업데이트 방정식을 반복하여 정책을 최적화함.

$$Q(s,a) \leftarrow Q(s,a) + \alpha[r(s,a) + \gamma \max_{a' \in \mathcal{A}} Q(s',a') - Q(s,a)]$$

○ 여기서 α는 학습률이며 s'와 a'는 각각 다음 iteration에서의 상태와 행동을 나타냄.

○ DQN (deep Q network)은 상태-액션 쌍(state-action pair)에 대한 Q-함수를 심층 신경망을 사용하여 네트워크 가중치 θ를 갖는 Q network로 근사화하며, Q network의 가중치 θ를 각 iteration에서 다음과 같은 손실함수를 최소화하기 위해 업데이트함.

$$L_i(\theta_i) = \mathbb{E}[(r(s,a) + \gamma \max_{a'} \hat{Q}(s',a';\theta_i^-) - Q(s,a;\theta_i))^2]$$

○ 여기서 θ_i^-와 θ_i는 각각 target 및 main network의 network 파라메터임.

○ Q-러닝은 상태-행동 공간이 매우 큰 문제를 처리할 수 없는데 비해 DQN은 Q 러닝에 심층 신경망을 결합하여 이러한 문제를 해결하였음. 혼잡 제어 설계는 옵션에 따라 가능한 상태-액션 쌍이 커지기 때문에 본 연구에서 DQN을 개발한 혼잡제어 기술에 적용하였음.

(라)-②-2. 강화학습 기반의 신규 기술

○ 기본 파라메터

- 개발하는 심층 강화학습 기반의 분산 혼잡 제어 알고리즘에 대한 기본 파라미터(에이전트, 상태, 행동, 보상)는 다음과 같음.
- 에이전트: 환경 내에서의 차량들이 에이전트이며 각각의 차량은 학습 데이터를 사용하여 독립적으로 정책을 학습함.
- 상태: 시간 단계 t에서, 상태는 다음 식과 같이 서브 프레임 n에서 측정된 된 CBR (Channel Busy Ratio)로 정의됨. CBR은 인접 차량이 사용하는 채널의 활용률임.

$$\omega_m^{\mathrm{CBR}}[n] = \frac{\sum_{n-1}^{n-100} \sum_{d \in \mathcal{D}} \psi_d}{100 \cdot D}$$

- 여기서, D는 서브 프레임 별 서브 채널의 수이며 Ψ_d는 binary indicator로써 d-번째 서브채널에서 측정된 RSSI (Received Signal Strength Indicator)가 사전 임계값보다 높으면 1 그렇지 않으면 0을 나타냄. CBR은 채널 혼잡 수준을 나타내며 일반적으로 DCC 알고리즘은 CBR을 기반으로 함.
- 행동: Transmission rate control은 C-V2X 환경에서 효과적으로 PDR (Packet delivery ratio)를 증가시키는 것으로 알려져 있음. 따라서 행동은 tranmission rate level의 집합으로 구성되며, 다음과 같이 표현됨.

$$\mathcal{A} = \{a_t^l | 1 \le l \le L\}$$

- 여기서 L은 선택 가능한 행동의 수를 나타내며 각 에이전트는 원래 전송 시간에 선택한 행동에 의해 전송을 지연한 후 패킷을 전송함. 최대 전송 주기를 고려하여, L = 4 및 A = {0, 0.1, 0.2, 1} 초로 설정함. 에이전트가 0을 선택하면 에이전트는 서브프레임 n+4에서 패킷을 전송함.
- 보상: 보상은 목적에 따라 다르게 정의할 수 있으며, 본 연구에서는 PDR의 최대화를 목적으로 하며 보상을 PDR로 설정함. PDR은 송신 차량이 보낸 총 패킷 수 중 다른 인접 차량들에 의해 성공적으로 수신된 패킷 수를 의미함. 그러므로, n번째 서브프레임의 d번째 서브채널을 사용하는 차량의 PDR은 다음과 같이 정의됨.

$$\varrho_m[n,d] = \frac{\sum_{k\in\zeta} \kappa_{m,k}[n,d]}{\sum_{k\in\eta} \nu_{m,k}[n,d]}$$

- 여기서 $\nu_{m,k}[n,d]$는 m번째 차량에서 η에 속하는 차량으로 전송된 패킷이고 $\kappa_{m,k}[n,d]$는 ζ에 속한 차량들에 의해 성공적으로 수신된 패킷을 의미함.
- η와 ζ는 각각 m번째 차량의 통신 범위 내에 있는 차량들의 집합 그리고 η에 속한 차량들 중 성공적으로 패킷을 수신한 차량들의 집합임. 두 집합에 포함된 차량수가 η에 포함된 차량수에 가까워질수록 PDR은 1로 증가함.
- 보상을 PDR로만 설정하게 되면, CBR이 계속 낮아지는 형상을 보임. 보상인 PDR을 최대화하기 위해 에이전트는 전송 주기를 높이며 이로인해 채널 사용률이 낮아짐.
- 따라서, 이러한 문제점을 해결하기 위하여 보상에 CBR condition을 다음과 같이 추가함.

$$r_t = \varrho_m[n,d] - |\omega^{\mathrm{tg}} - \omega_m^{\mathrm{CBR}}[n]|$$

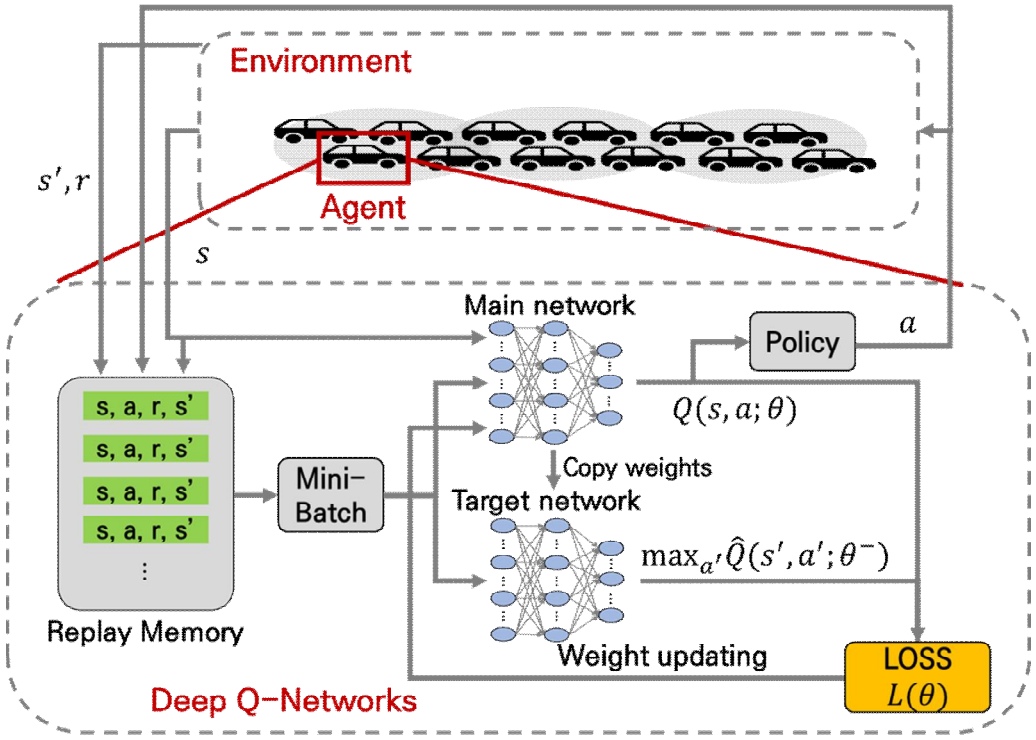
- 여기서 ω^{TG}는 목표로하는 target CBR을 나타내며 CBR condition은 채널 사용률이 target CBR보다 낮거나 높으면 패널티로 작용함.

○ 학습 단계

- 그림 1은 개발된 심층 강화 학습 기반 DCC의 아키텍처를 보여줌. Q 값을 추정하기 위한 DQN은 각각 50개의 뉴런이있는 2개의 hidden layer로 이루어진 fully-connected network로 구성되며 알고리즘 1은 개발한 알고리즘의 수도코드를 나타냄.
- 에이전트가 n+4의 서브 프레임에서 패킷을 전송한다고 가정하면, 서브 프레임 n에서 CBR (s_t)을 측정함. 그 다음, 에이전트는 측정된 CBR을 기반으로 집합 A에서 최대 Q 값을 갖는 행동을 선택하고 선택한 행동 (a_t)에 따라 전송 주기를 조절하여 메시지 전송을 지연시킴.
- 지연된 시간에 패킷이 전송되고 에이전트는 보상 (r_t)을 관찰함. s_{t+1}은 다음 전송 시간에 측정된 CBR로 설정되며

(s_t,a_t,r_t,s_{t+1})의 정보는 리플레이 메모리 E에 삽입됨.

- 그런 다음 에이전트는 E에서 random 미니 배치를 샘플링하고 이를 사용하여 목표값 y_j를 결정함.
- 최적화는 손실 함수 (loss function)를 통해 수행되며, 이를 통해 main network의 파라메터 θ가 업데이트됨. Target network의 파라메터 θ^-는 C 시간 단계마다 main network의 동일한 θ로 주기적으로 업데이트되며 본 연구에서 C는 100으로 설정함.
- 학습 중에 메모리 크기 N은 100000으로 설정하고 미니 배치 크기는 256으로 설정함. Adam Optimizer는 손실 함수를 최소화하는 데 사용되며 학습률과 discount factor는 각각 0.01 및 0.99로 설정됨.
- 그런 다음, ϵ-greedy 정책을 사용하여 훈련 중 exploration과 exploitation의 균형을 맞춤. ϵ-greedy 정책에서 액션은 ϵ 확률로 무작위로 선택되고, 행동 값이 가장 큰 행동은 1-ϵ 확률로 선택됨. 초기 ϵ는 1로 설정되고 0.01로 감소하며, 그 후 에이전트는 ϵ = 0.01로 훈련을 계속 수행함.



[심층 강화학습 기반의 분산혼잡제어 기술의 아키텍쳐]

Algorithm 1 DRL-Based DCC Algorithm

Initialize replay memory $\mathcal{E}$ to capacity N
Initialize Q-function with random weights θ
Initialize target $\hat{Q}$-function with the same weights: $\theta^{-} = \theta$
for episode = 1, M **do**
  for time step = 1, T **do**
    With probability select a_t random action
    Otherwise select $a_t = \text{argmax}_a Q(s_t, a; \theta)$
    Execute action a_t in simulator
    Observe reward r_t and next state s_{t+1}
    Store the experience (s_t, a_t, r_t, s_{t+1}) in $\mathcal{E}$
    Sample random minibatch of experiences from $\mathcal{E}$
    Set $y_j = r_j + \gamma \max_{a'} \hat{Q}(s', a'; \theta^{-})$
    Perform optimization and update θ
    Update target network $\hat{Q}$ with $\theta^{-} = \theta$ every C steps
  end for
end for

[심층 강화학습 기반의 분산혼잡제어 기술의 수도코드]

(라)-②-3. 강화학습 기반의 신규 기술의 성능 분석

○ 개발한 강화학습 기반의 신규 기술의 CBR 성능 분석을 진행함.

○ 차량 밀도가 증가함에 따라 PDR 저하가 발생하며 DCC 알고리즘은 일반적으로 CBR을 줄여 감소를 최소화함. 그러나 CBR을 낮추면 처리량 성능이 저하됨.

○ 따라서, 분산혼잡제어 기술은 최소한의 채널 사용률을 보장할 수 있어야 하며 측정된 CBR이 target CBR 근처로 수렴해야 함.

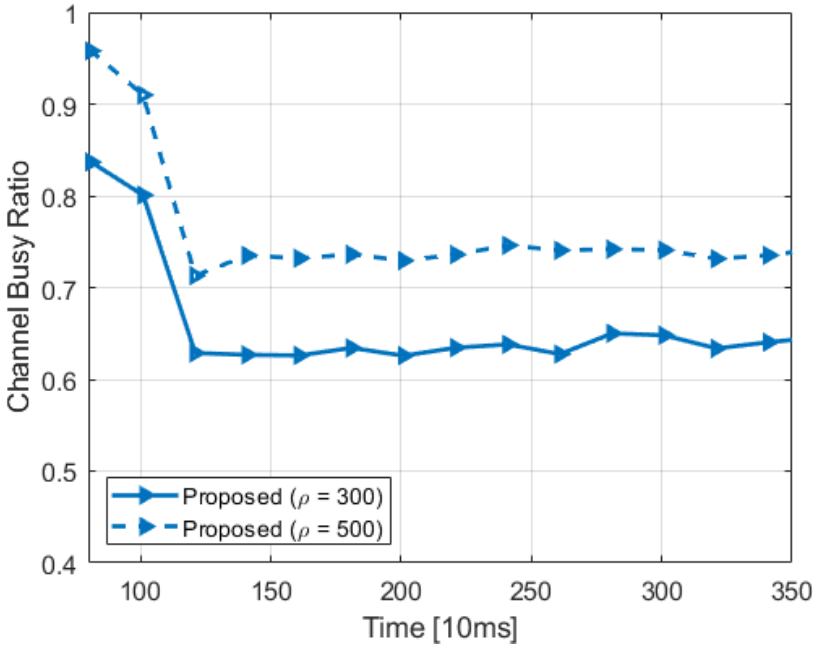
○ 다음과 같은 시뮬레이션 환경을 설정하고 CBR 성능 변화를 살펴봄.

- mobility model
  - ✓ 고속도로 환경을 가정
  - ✓ 차량은 random하게 도로상에 위치
  - ✓ 차량 수를 300, 500대로 변화시킴.
- Channel model
  - ✓ WINNER II에서의 경로 손실 모델을 사용
  - ✓ 고속도로 환경이므로, LOS 경로손실 모델을 적용함.
- 그 외 파라메터 값
  - ✓ 자원할당방식 : Mode 4(SPS)

Parameter	Value
Message size	300 Byte
MCS index	6
Bandwidth	10 MHz
Tx power	23 dBm
Tx rate (default)	0.1 sec
Antenna gain (G_r)	3 dB
Noise figure	9 dB
Sensing power threshold	-94 dBm
Target CBR (ω^{tg})	0.65
Propagation model	Winner+ B1
Shadowing	Variance 3dB Decorrel. distance 25m
Average vehicle density (ρ)	[300, 500] veh/km
Mean speed of vehicles	50 km/h
Standard deviation of speed of vehicles	3 km/h

[시뮬레이션 파라미터]

- CBR vs Time 결과 분석



[CBR vs time]

✓ 다음 그림은 차량 밀도 변화에 따른 CBR 성능 변화를 나타냄.

✓ ρ = 300 및 ρ = 500에서, 차량이 150m의 통신 반경 내에서 인식하는 주변 차량의 평균 수는 82~140에 해당하고 두 경우 모두 측정된 CBR이 0.8 이상으로 매우 혼잡한 상황을 나타냄.

✓ CBR은 DCC가 적용된 시점부터 특정 값으로 수렴함. 제안된 알고리즘에서 CBR은 ρ = 300의 경우 0.65로, ρ = 500의 경우 0.74로 수렴함.

✓ 위의 결과는 개발한 강화학습 기반의 분산혼잡제어 기술이 target CBR로 수렴할 수 있음을 나타냄.

(마) 개발된 V2X 네트웍 분산혼잡제어 기술의 성능 검증

○ 개요

- 개발한 강화학습 기반의 분산혼잡제어 기술을 3GPP TSG RAN1 기술문서[11]에서 정의한 분산혼잡제어 기술과 성능 비교를 수행함.
- 본 연구에서는 PDR 및 Sidelink 처리량 (SLT, sidelink throughput)을 성능 지표로 사용하여 혼잡제어 성능을 평가함.
- PDR은 네트워크에서 실제로 수신된 총 패킷 수를 네트워크에서 전송된 총 패킷 수로 나눈 값으로 정의함.
- SLT는 차량이 인접 차량으로부터 수신하는 단위 시간당 데이터 볼륨으로 정의하며, 모든 차량 쌍(vehicle-pair)에 대해 평균화됨.
- SLT는 패킷 손실로 인한 지연시간이 늘어나거나 낮은 전송 주기를 사용했을 시 성능이 감소하며 통신 지연 성능과 신뢰성을 모두 측정하는 성능지표로써, 총 전송 패킷 수가 다를 때 공정한 비교가 가능함.
- 일반적으로 V2X 안전 애플리케이션은 다른 애플리케이션보다 더 높은 시스템 성능을 필요로하며 특히 근거리에서의 시스템 성능이 중요함.
- 따라서, 150m 이내의 통신 범위에 대한 PDR 및 SLT 성능을 분석함.

○ 비교 분산혼잡제어 기술

- 3GPP TSG RAN1 기술문서는 CBR과 CR에 따른 전송 주기를 조절하는 패킷드랍 방식의 분산혼잡 제어를 제안함.
- 차량은 패킷을 보내기로 결정하면 CBR을 측정함. 그런 다음 차량은 측정된 CBR에 해당하는 채널 리소스의 최대 비율을 제한하는 CRlimit을 선택함.
- 차량은 자신의 CR을 CRlimit와 비교하고 CR이 CRlimit보다 높으면 차량은 CR을 해당 한계 미만으로 줄여야 함.
- 3GPP TSG RAN1 기술문서에서, 각 CBR 구간에 대한 CRlimit를 결정하기 위한 일반화된 공식을 제안함.
- 공식을 사용하면 CBR에 따른 CRlimit를 사전에 구성할 수 있음. 다음 표는 문서에서 제공하는 사전 구성된 CRlimit 표을 나타냄.
- 본 연구에서는 아래 표를 기반으로 한 패킷 드롭핑을 제안한 기술과의 성능 비교를 위한 벤치마크로 사용함.

CBR measured	CR limit
CBR $\leq$ 0.650	no limit
0.650 < CBR $\leq$ 0.675	1.6e-3
0.675 < CBR $\leq$ 0.700	1.5e-3
0.700 < CBR $\leq$ 0.725	1.4e-3
0.725 < CBR $\leq$ 0.750	1.3e-3
0.750 < CBR $\leq$ 0.800	1.2e-3
0.800 < CBR $\leq$ 0.825	1.1e-3
0.825 < CBR $\leq$ 0.850	1.0e-3
0.850 < CBR $\leq$ 0.875	0.9e-3
0.875 < CBR	0.8e-3

[CR_{limit} 값]

○ 시뮬레이션 환경

- 다음과 같은 시뮬레이션 환경을 설정하고 PDR 및 SLT의 성능을 분석함.

✓ mobility model

- 고속도로 환경을 가정
- 차량은 random하게 도로상에 위치
- 차량 수를 300, 500대로 변화시킴.

✓ Channel model

- WINNER II에서의 경로 손실 모델을 사용
- 고속도로 환경이므로, LOS 경로손실 모델을 적용함.

✓ 그 외 파라메터 값

- 자원할당방식 : Mode 4(SPS)

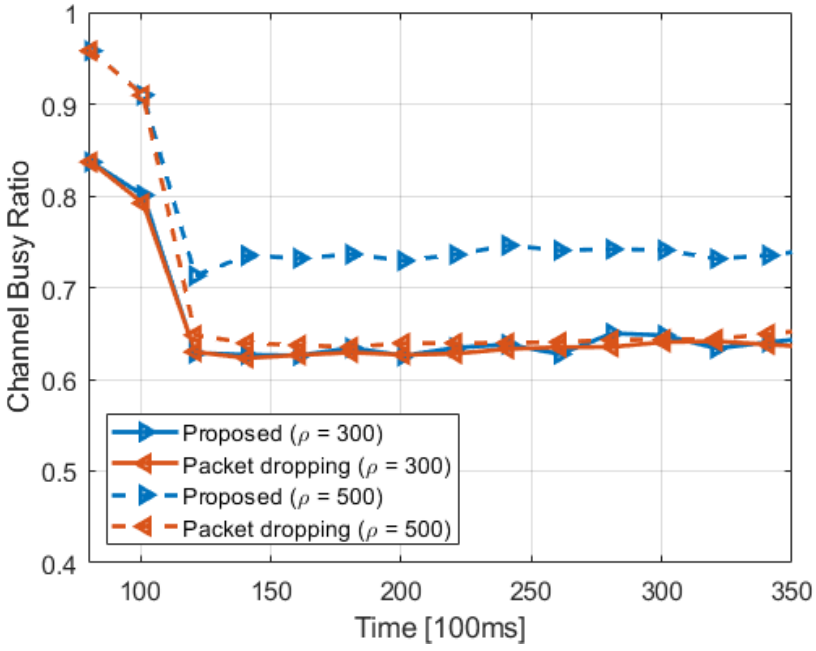
- 패킷 드롭핑에서 CBR 및 CR의 sensing window는 각각 100ms 및 1초로 설정함. 나머지 시뮬레이션 파라메터는 아래 표와 동일함.

Parameter	Value
Message size	300 Byte
MCS index	6
Bandwidth	10 MHz
Tx power	23 dBm
Tx rate (default)	0.1 sec
Antenna gain (G_r)	3 dB
Noise figure	9 dB
Sensing power threshold	-94 dBm
Target CBR (ω^{tg})	0.65
Propagation model	Winner+ B1
Shadowing	Variance 3dB Decorrel. distance 25m
Average vehicle density (ρ)	[300, 500] veh/km
Mean speed of vehicles	50 km/h
Standard deviation of speed of vehicles	3 km/h

[시뮬레이션 파라미터]

○ 시뮬레이션 결과

- CBR vs Time 결과 분석



[CBR vs Time]

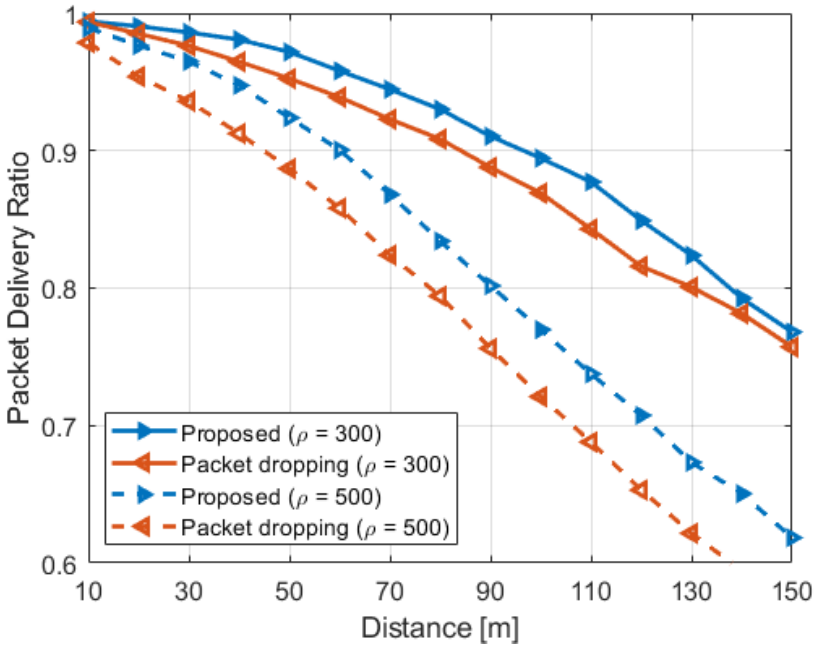
✓ 패킷 드랍핑은 밀도가 다른 두 경우에 대해서 CBR이 모두 0.65로 수렴함. 이는 사용된 CRlimit 표가 0.65의 target CBR을 기반으로 구성됐기 때문임.

✓ 제안하는 기술은 ρ = 300의 CBR은 ω^{TG}로 수렴하는 반면 ρ = 500의 CBR은 ω^{TG}보다 0.09 높은 지점에서 수렴함.

✓ CBR이 0.74로 수렴하면 일반적으로 보상 함수의 CBR condition에 따라 0.09의 페널티가 발생함. 이는 패널티에도 불구하고 보상이 극대화되는 지점이 0.74로 수렴됨을 의미함.

✓ 위 결과에서, 패킷 드랍핑은 CBR이 0.65로만 수렴하지만 개발한 강화학습 기반의 분산혼잡제어 기술은 차량 밀도의 변화에 따라 성능이 향상되는 최적의 CBR로 적응적으로 수렴함을 보여줌.

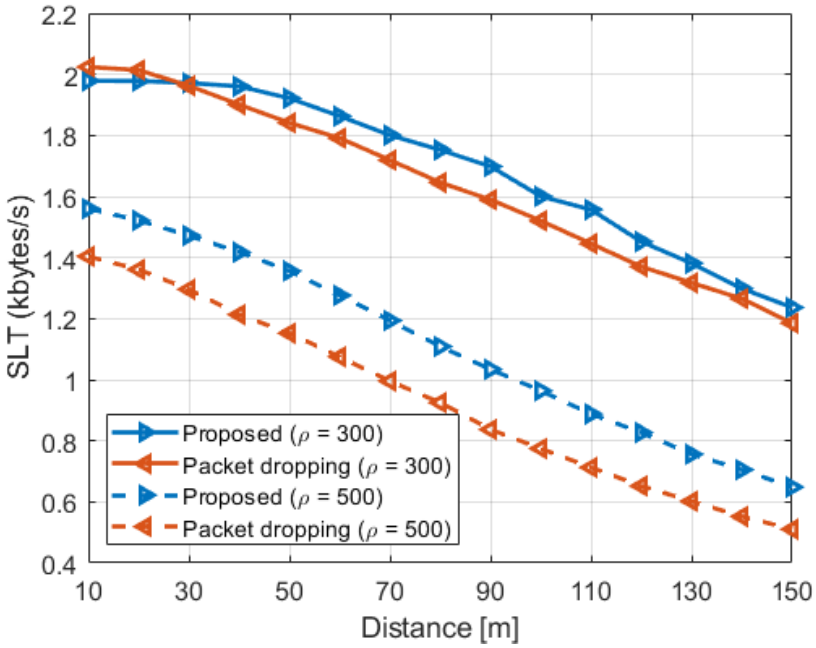
- PDR vs Distance 결과 분석



[PDR vs Distance]

- ✓ 시뮬레이션 결과는 수신기-송신기 거리 D에 따른 PDR을 보여줌.
- ✓ 제안된 기술은 기존 패킷 드롭핑보다 전체 거리에서 더 높은 PDR 성능을 보여줌.
- ✓ 결과에서, PDR = 0.9를 만족하는 D는 모든 경우에서 패킷드롭핑보다 약 10m 이상 커짐.
- ✓ ρ = 300 및 ρ = 500에서, 제안된 방식은 10m의 커버리지 확장으로 인해 패킷 드롭핑에 비해 전송된 메시지를 수신하는 차량 수가 각각 약 10%와 20%씩 증가함.

- SLT vs Distance 결과 분석



[SLT vs Distance]

✓ 시뮬레이션 결과는 수신기-송신기 거리 D에 따른 SLT를 보여줌.

✓ 제안된 기술은 밀도가 다른 두 경우에 대해서 기존 패킷 드롭핑보다 평균적으로 더 높은 SLT 성능을 보여줌.

✓ ρ = 300 및 ρ = 500에서, 제안된 방식의 평균 STL은 패킷 드랍핑보다 각각 0.022 및 0.075 kbyte/s 더 높음.

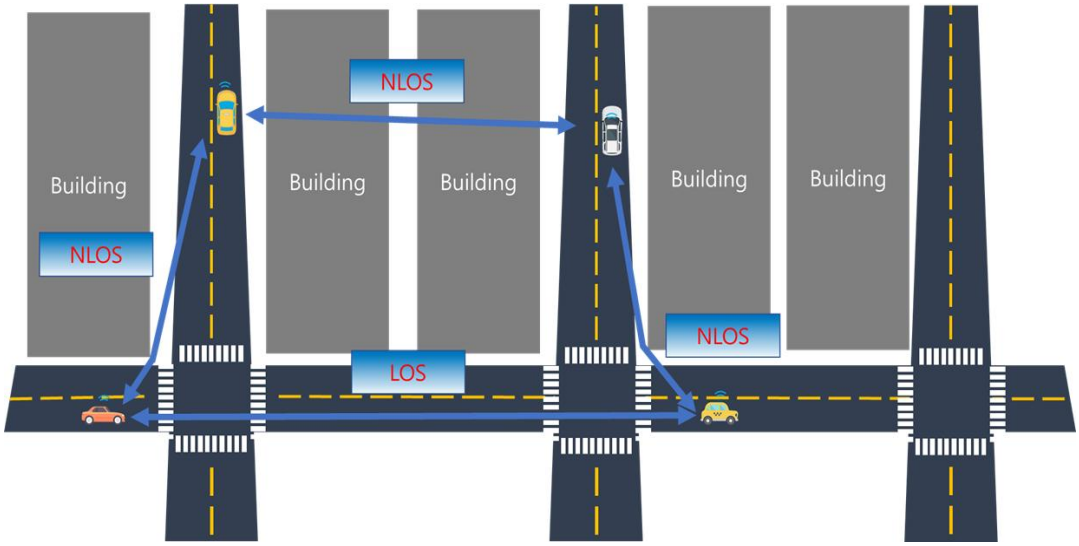
✓ SLT는 패킷 손실로 인한 지연시간이 늘어날수록 감소함. 따라서, 제안된 기술은 기존의 패킷드랍핑보다 평균 통신 지연시간이 낮음.

(2) C-V2X Cross-layer (PHY/MAC) 시뮬레이터 개발

(가) 도심 V2V 채널 모델 및 3GPP C-V2X/eV2X PHY&MAC 표준 조사

(가)-① 도심 V2V 채널 모델

○ 도심 환경에서는 V2X 통신의 송신기 또는 수신기가 되는 차량과 기지국은 주변 건물보다 낮은 지역에 위치하며, 아래 그림과 같이 송신기와 수신기 간에 장애물이 없는 LOS(line of sight) 경로와 송신기와 수신 기간에 장애물이 있는 NLOS(non line of sight) 경로가 혼재하여 발생함.



[도심에서의 LOS와 NLOS 환경]

○ 위와 같은 채널 환경에 적합한 경로 손실 모델에 대한 측정과 모델링 연구들이 많이 수행되었으며, 3GPP에서는 WINNER-II 모델을 이용하여 C-V2X에 대한 연구를 수행함. WINNER-II 모델은 WINNER (Wireless World Initiative New Radio) 프로젝트에 의해 개발된 경로손실 모델로써, 2~6 GHz 주파수 대역에서 반경 1km 이하의 마이크로 셀 도심 전파환경에 대해 수행된 측정에 의한 측정값을 기반으로 함.

○ WINNER-II 모델에서는 LOS와 NLOS 환경에 따라 경로 손실 모델이 다르게 적용되며, LOS 환경에서는 송신기와 수신기의 유효 높이(effective height)에 의해 결정되는 break point d'_{BP}를 중심으로 서로 다른 기울기, 즉 서로 다른 경로 손실 지수 값을 갖는 경로 손실 모델을 사용함. WINNER-II 모델에서 LOS와 NLOS 조건에 따라 적용되는 경로 손실 모델은 다음과 같음.

$$\overline{PL_{LOS}}(dB) = \begin{cases} 22.7\log_{10}(d) + 27.0 + 20\log_{10}(f_c), & d < d'_{BP} \\ 40.0\log_{10}(d) + 7.56 - 17.3\log_{10}(h'_{MS}) \\ -17.3\log_{10}(h'_{MS}) + 2.7\log_{10}(f_c), & d \geq d'_{BP} \end{cases}$$

$$\overline{PL_{NLOS}}(dB) = (44.9 - 6.55\log_{10}(h_{MS}))\log_{10}(d) + 5.83\log_{10}(h_{MS}) + 18.38 + 23\log_{10}(f_c)$$

○ 마지막으로, 경로 손실 $PL(dB)$는 쇄도우 페이딩을 고려하여 다음 수식과 같이 평균 경로 손실에 쇄도우 페이딩 랜덤변수 X_σ가 더해져 결정됨.

$$PL(dB) = \overline{PL}(dB) + X_\sigma$$

○ 여기서, 평균 경로 손실$PL(dB)$는 환경에 따라 $PL_{LOS}(dB)$또는 $PL_{NLOS}(dB)$가 되고, X_σ는 LOS 조건에서는 3dB의 표준편차, 그리고 NLOS 조건에서는 4dB의 표준 편차에 의해 결정되는 쇄도우 페이딩 효과를 나타내는 랜덤 변수임.

(가)-② 3GPP C-V2X/eV2X PHY 표준 조사

○ 3GPP Release 14 C-V2X 개요

- 전세계 800 개 이상의 이동 통신 사업자는 3GPP 표준과 호환되는 네트워크를 구축하여 글로벌 상호 운용성과 규모의 경제를 활용할 수 있다. 2017 년 6 월, 3GPP는 표준 릴리스 14에서 C-V2X (Cellular Vehicle-to-Everything) 기술을 완성했다. LTE를 기반으로 하는 이 셀룰러 기술은 차량에 안전 및 정보 서비스를 제공하도록 설계되어 혼잡과 오염을 줄이고 협력을 보다 빠르고 효율적으로 수행하는 C-ITS (Cooperative Intelligent Transport System)의 개발을 가능하게 함.
- 2017 년 6 월, 모바일 산업 단체 인 3GPP는 차량과 도로 인프라 간의 통신이 가능하도록 특별히 설계된 일련의 기술을 표준화했다. C-V2X (Cellular Vehicle-to-Everything)로 알려진 이 기술은 다음을 통해 안전성을 향상시키고 궁극적으로 자율 주행을 지원할 수 있음.
  - ✓ 안전하고 이미 확립 된 LTE 네트워크의 포괄적인 범위 활용
  - ✓ 고속 및 고밀도 트래픽에서 매우 안정적인 실시간 통신을 가능하게 함.
  - ✓ 차량과 도로변 인프라 간의 단거리 및 장거리 전송 지원
- C-V2X는 운전자의 시선을 벗어난 조건에 대한 실시간 정보를 제공함으로써 차량의 다른 센서와 함께 안전을 강화할 수 있음. C-V2X 시스템에서 캡처 한 정보는 레이더, 라이더 및 초음파 시스템에서 캡처하는 데이터를 보완하여 운전자가 차량과 차량을 안전 거리에서 앞쪽으로 유지하고 악천후 및 저조도 상황에 대처할 수 있도록 도와줌. 차량의 온보드 컴퓨터는 C-V2X를 통해 수신된 데이터와 온보드 카메라로 캡처 한 정보를 결합하여 도로 표지판과 물체를 해석할 수 있음. 또한 3D 및 HD지도에서 차량의 위치를 나타내는 GNSS 시스템을 셀룰러 네트워크를 통해 실시간으로 업데이트 할 수 있음. 끊임없이 진화하고 개선된 센서의 융합 전산 기계 지능은 궁극적으로 인간 운전자의 감지 및 인지 능력을 모방한 다음 결국은 그것을 능가하게 될 것임.

○ C-V2X의 운용 모드

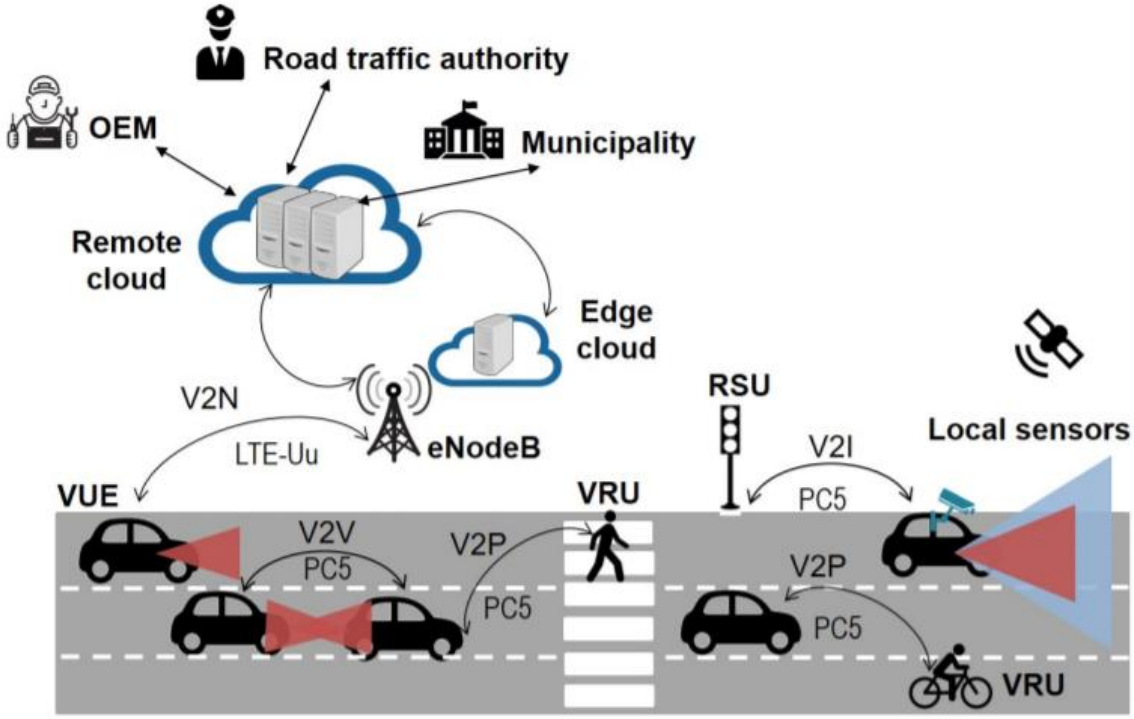
- 4G 기반의 고급 기술인 C-V2X는 일반적으로 802.11p로 알려진 Wi-Fi 변형을 기반으로하는 이전의 전용 차량 연결 솔루션과 비교하여 더 광범위한 기능을 지원할 수 있다. C-V2X는 두 가지 보완 전송 모드를 사용하여 매우 다양한 주행 안전 기능을 지원함. 두 가지 모드는 다음과 같음.
  - ✓ Direct Communications: 차량 (V2V), 차량과 인프라 (V2I), 차량과 자전거 및 보행자 (V2P)와 같은 기타 도로 사용자 간의 직접 통신용 모드임. 이 모드에서 C-V2X는 5.9GHz 주파수 대역에서 작동함. 해당 대역은 차량 안전을 위해 국제적으로 식별되고 조화를 이루는 ITS (지능형 운송 시스템) 대역을 의미함. 이 모드에서 C-V2X는 셀룰러 네트워크와 독립적으로 작동함.
    - 전 세계 정부는 ITS 5.9GHz 스펙트럼 대역을 별도로 설정하여 간섭을 받지 않는 전용 주파수를 사용하여 차량이 서로 통신 할 수 있도록 함. 이 밴드를 사용하면 C-V2X는 셀룰러 네트워크의 개입없이 짧은 거리에서 직접 짧은 대기 시간 연결을 지원할 수 있음. 802.11p와 마찬가지로 C-V2X는 GNSS (Global Navigation Satellite System)를 사용하여 차량의 위치를 결정하고 차량 간 및 도로변 인프라와의 통신을 동기화함.
    - 이 모드에서는 차량이 셀룰러 네트워크에 연결할 필요가 없으므로 SIM 카드가 필요하지 않음. 직접 안전

통신을 위해 셀룰러 가입이 필요하지 않으므로 차량과 운전자는 익명으로 유지됨. C-V2X와 802.11p는 5.9GHz 대역 내에서 서로 다른 채널을 사용하여 ITS 스펙트럼에 공존할 수 있음.

- 5.9GHz 대역에서 단 10MHz의 스펙트럼 기본 안전 서비스를 지원하려면 70MHz가 필요하며 차량용 센서로 수집된 대량의 데이터 공유와 같은 고급 안전 서비스를 지원할 수 있음.

✓ Network Communications: C-V2X가 차량이 해당 지역의 도로 상황 및 교통 정보를 수신할 수 있도록 하기 위해 기존의 모바일 네트워크를 사용하는 네트워크 통신모드임. 이 모드에서 C-V2X는 고객과의 연결을 제공하기 위해 이동 통신 사업자에게 라이센스가 부여 된 스펙트럼에서 작동함.

- C-V2X는 또한 상용 라이센스 셀룰러 스펙트럼을 통해 전달되는 V2N (Vehicle-to-Network) 애플리케이션도 지원할 수 있음. 이 모드는 안전 관련 기능 및 상용 서비스에 대한 네트워크 지원을 제공하고 모바일 운영자의 참여가 필요하며 클라우드 기반 데이터 또는 정보에 대한 액세스를 제공하는 데 사용될 수 있음.
- 이 모드를 통해 C-V2X는 모바일 네트워크의 데이터 보안 및 개인 정보 보호 기능을 활용할 수 있음.
- 네트워크 에지에서 컴퓨터 서버 및 데이터 분석을 배포하는 에지 컴퓨팅을 통해 시간이 중요한 서비스를 지원할 수 있음.
- C-v2X는 단기간에 배포 가능하고 미래에 대비할 수 있도록 개발되었으며 오늘의 사용 사례와 내일의 사용 사례 모두 4G 및 5G 셀룰러 네트워크와 호환되며 확장 가능하고 상호 운용 가능해야 함.
- C-V2X는 차량이 센서에 의해 수집 된 정보, 그리고 궁극적으로 연결된 자동화 된 운전 (CAD)과 협력, 조정 및 공유 할 수있는 첨단 운전자 보조 시스템 (ADAS)을 지원할 예정임.



[C-V2X 의 두가지 모드: PC5 mode for Direct communications and LTE-Uu mode for Network communications]

○ C-V2X의 목표 성능치

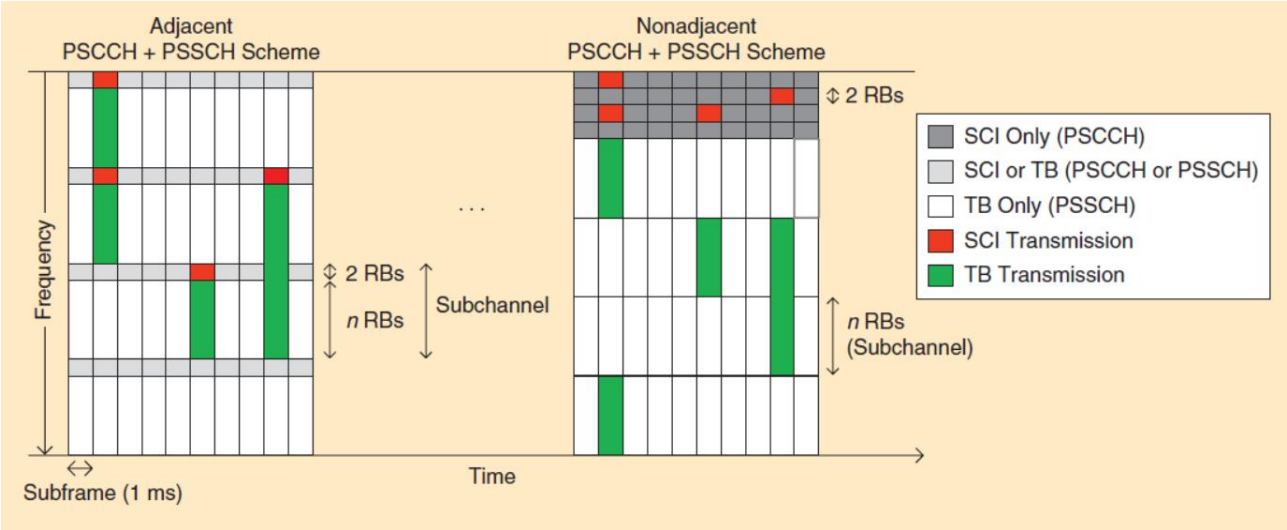
[목표성능치: TR 22.885]

Parameters / Scenarios	Effective distance	Absolute speed of a UE	Relative speed between 2 UEs	Maximum tolerable latency	Minimum radio layer message reception reliability
#1 suburban	200m	50km/h	100km/h	100ms	90%
#2 freeway	320m	160km/h	280km/h	100ms	80%
#3 Autobahn	320m	280km/h	280km/h	100ms	80%
#4 NLOS/urban	150m	50km/h	100km/h	100ms	90%
#5 urban intersection	50m	50km/h	100km/h	100ms	95%
#6 campus/ shopping area	50m	30km/h	30km/h	100ms	90%
#7 Imminent crash	20m	80km/h	160km/h	20ms	95%

○ C-V2X의 주요 물리계층 특징

- C-V2X는 단일 반송파 주파수 분할 다중 액세스를 사용하며 10MHz 및 20MHz 채널을 지원함. 각 채널은 서브 프레임, 자원 블록 (RB) 및 서브 채널로 구분된다. 서브 프레임은 전송 시간 간격 (TTI)과 같이 1ms 길이임.
- RB는 사용자에게 할당 될 수있는 가장 작은 주파수 자원 단위임. 주파수는 180kHz임(15kHz의 12 개 부반송파).
- C-V2X는 서브 채널을 동일한 서브 프레임에서 RB 그룹으로 정의하며 서브 채널당 RB의 수는 달라질 수 있음. 서브 채널은 데이터를 전송하고 정보를 제어하는 데 사용됨.
- 데이터는 물리적 사이드 링크 공유 채널 (PSSCH)을 통해 전송 블록 (TB)으로 전송되며 SCI (Sidelink Control Information) 메시지는 PSCCH (Physical Sidelink Control Channel)를 통해 전송됨.
- TB는 비콘 또는 협동 인식 메시지와 같이 전송 될 전체 패킷을 포함한다. TB를 전송하려는 노드는 연관된 SCI도 전송해야하며이를 스케줄링 지정이라고도함.
- SCI는 TB를 전송하는데 사용되는 MCS (modulation and coding scheme), 그것이 사용하는 RB, 및 semipersistent 스케줄링 (SPS)을위한 자원 예약 간격과 같은 정보를 포함함. 이 정보는 다른 노드가 전송 된 TB를 수신하고 디코딩 할 수 있도록하는 데 중요하므로 SCI를 올바르게 수신해야 함.
- TB와 관련 SCI는 항상 동일한 서브 프레임에서 전송되어야 함.
- 부채널 구성방법
  - ✓ 인접 PSCCH + PSSCH :
    - SCI 및 TB는 인접한 RB에서 전송된다. 각각의 SCI + TB 전송에 대해, SCI는 전송에 이용 된 제 1 서브 채널의 처음 2 개의 RB를 차지함.
    - TB는 SCI에 따라 RB에서 전송되며 크기에 따라 여러 서브 채널을 차지할 수 있다. 그렇게하면 다음 하위 채널의 처음 두 RB도 차지함.
  - ✓ 인접하지 않은 PSCCH + PSSCH :
    - RB는 풀로 나뉩니다. 하나의 풀은 SCI 만 전송하는 데 사용되며 SCI는 두 개의 RB를 차지함.

- 두 번째 풀은 TB 만 전송하도록 예약되어 있으며 서브 채널로 나뉨.



[2가지 부채널 구성 방법]

○ C-V2X의 기술적 장점

- C-V2X는 아래 표에 요약된 것처럼 802.11p 기반 대안에 비해 여러 가지 기술적 이점이 있음. 이러한 이점을 함께 사용하면 링크 예산과 시스템 성능이 크게 향상된다. 802.11p에 비해 범위, 도플러 (속도) 및 안정성이 뛰어남.
- C-V2X는 더 높은 스펙트럼 효율을 제공하므로 주어진 스펙트럼에서 더 많은 도로 사용자에게 서비스를 제공 할 수 있음. 따라서 C-V2X는 대체 기술보다 더 많은 도로 사용자에게 더 높은 수준의 안전을 제공할 수 있음. 보다 광범위하게는 차량 간의 직접 통신에만 의존하는 임시 네트워크가 될 수 있음.
- 프로토콜 오버헤드로 인해 홉 수가 증가하면 비효율적이다. 실제 한계는 5 홉임. 그러나 차량의 앞뒤에 활성 안테나 시스템이 있는 경우 홉 수를 두 배로 늘릴 수 있음. C-V2X는 탁월한 직접 통신뿐만 아니라 802.11p보다 높은 수준의 보안을 제공함. 모든 작동 모드. 모바일 사업자는 네트워크를 오가는 모든 트래픽을 보호함. PKI (Public Key Infrastructure) 암호화 서비스가 추가되었음.

구분	c-v2x: pc5	802.11p	c-v2x: pc5 Ad
Synchronization	Synchronous	Asynchronous	Spectral Efficiency. Synchronization enables time division multiplexing (TDM) and lowers channel access overhead.
Resource Multiplexing Across Vehicles	FDM and Time Division Multiplexing (TDM) Possible	TDM Only	Frequency Division Multiplexing allows for larger link budget and therefore longer range - or more reliable performance at the same range
Channel Coding	Turbo	Convolutional	Coding gain from turbo codes leads to longer range - or more reliable performance at the same range

Retransmission	Hybrid Automatic Repeat Request (HARDQ)	No HARQ	Leads to longer range - or more reliable performance at the same range
Waveform	SC-FDM	OFDM	Allows for more transmit power with the same power amplifier. Leads to longer range - or more reliable performance at the same range
Resource Selection	Semi-persistent transmission with relative energy-based selection.	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA -CA)	Optimizes resource selection with selection of close to 'best' resource with no contention overheads. By contrast 802.11p protocol selects the first "good enough" resource and requires contention overhead.

○ 3GPP Release 15 eV2X 개요

- 차량의 자율주행 수준이 높아짐에 따라 자율주행 차량의 주행 판단을 돕고 사용자의 편의를 더욱 증대하는 등의 목적으로 새로운 서비스가 도입되고 있음. 이들 서비스를 위해 각 차량은 더 많은 데이터를 주변 차량, 보행자, 도로 인프라, 응용 서버 등과 보다 신속하고 신뢰성 있게 주고받아야 함.
- 기존의 C-V2X 기술로는 이러한 새로운 서비스를 제공하기에 한계가 있고, 이에 따라 보다 진화된 eV2X 표준이 개발되었음.

○ 3GPP Release 15 eV2X 기술로 제공할 자율 주행 관련 서비스 4가지

- 군집주행:
  - ✓ 주요 요구사항
    - 군집 차량 수: 최대 5 대 또는 최대 20 대
    - 0.5m 미만의 상대 종 방향 위치 정확도를 지원
  - ✓ 주요 성능지표 (낮은 수준의 자율 주행)
    - 최대 50 개의 메시지 / 초의 전송 속도
    - 페이로드 50 – 6500 바이트
    - 최대 대기 시간 ~ 25ms
    - 350m까지의 범위
  - ✓ 주요 성능지표 (높은 수준의 자율 주행)
    - 최대 50 개의 메시지 / 초의 전송 속도

- 페이로드 50 – 6500 바이트
- 최대 대기 시간 ~ 20ms
- 최대 180m 범위

- 고도주행: 반자동 또는 완전 자동 운전 활성화

✓ 주요 성능지표 (낮은 수준의 자율 주행)

- 최대 6500 바이트의 페이로드
- 지연 시간 100ms
- 신뢰성 90 %
- 최대 700m 범위

✓ 주요 성능지표 (높은 수준의 자율 주행)

- 최대 6500 바이트의 페이로드
- 지연 시간 10ms
- 신뢰성 99.99 % 또는 99.999 %
- 최대 53Mbps의 데이터 속도
- 최대 360m 범위

- 센서확장: 로컬 센서 또는 라이브 비디오 이미지를 통해 수집된 원시 또는 처리 된 데이터 교환 가능. 데이터 속도 및 범위는 지원되는 사용 사례 및 센서 데이터의 로컬 처리 수준에 따라 크게 다름.

✓ 주요 성능지표 (낮은 수준의 자율 주행)

- 지연 시간 50ms
- 신뢰성 90-99 %
- 데이터 속도 ~ 10Mbps @ 100m 또는 1000m

✓ 주요 성능지표 (높은 수준의 자율 주행)

- 지연 시간 10ms
- 신뢰성 99.99-99.999 %
- 데이터 속도는 10Mbps에서 1000m에서 최대 1Gbps에서 50m까지

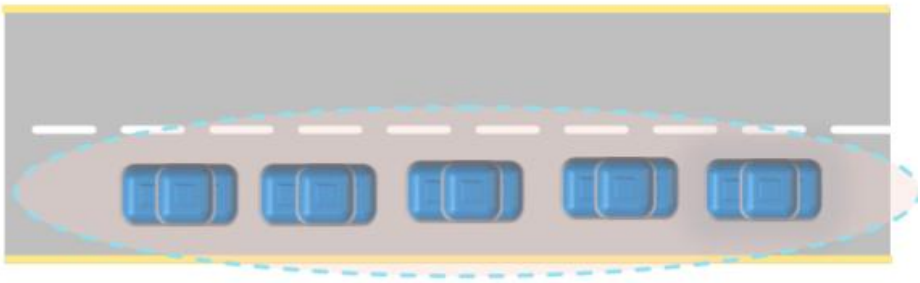
- 원격주행: 원격 드라이버 또는 V2X 애플리케이션을 사용하여 원격 차량 작동

✓ 주요 요구사항

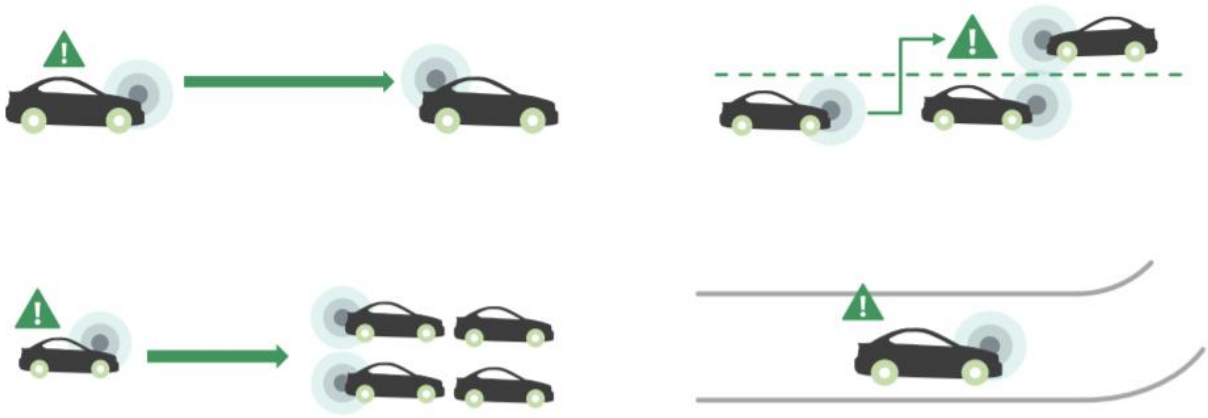
- 최대 250kmph의 절대 속도

✓ 주요 성능지표

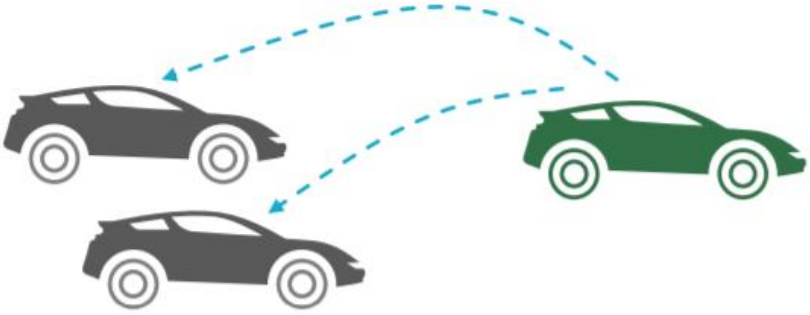
- 초고 신뢰성〉 99.999 %
- 대기 시간 5ms
- 데이터 전송률 UL : 25Mbps, DL : 1Mbps



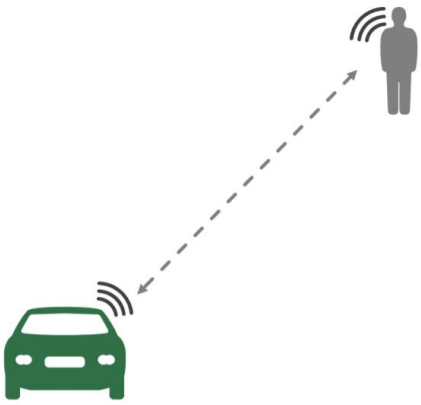
[자율주행 서비스 1: 군집주행]



[자율주행 서비스 2: 고도주행]



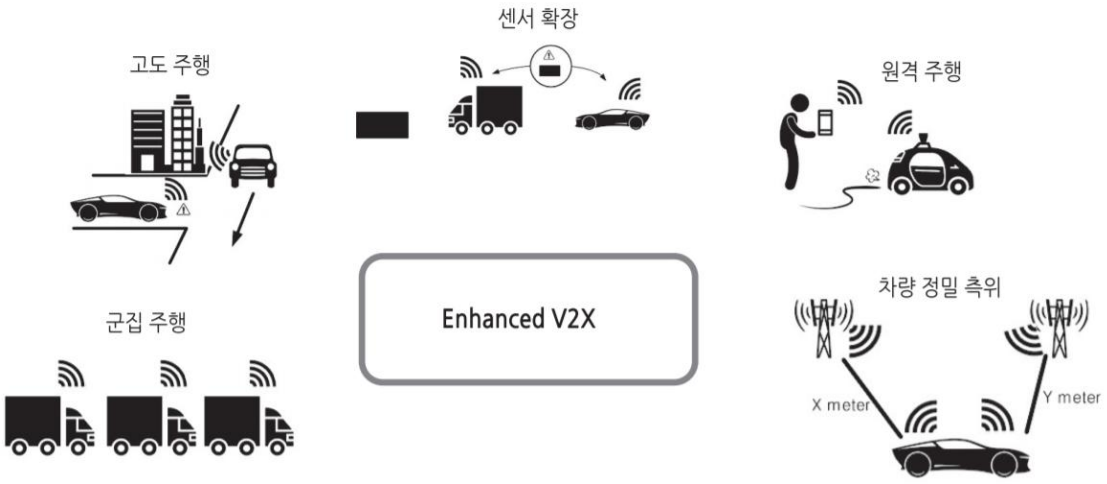
[자율주행 서비스 3: 센서확장]



[자율주행 서비스 4: 원격주행]

○ 3GPP Release 15 eV2X가 제공하는 신기술

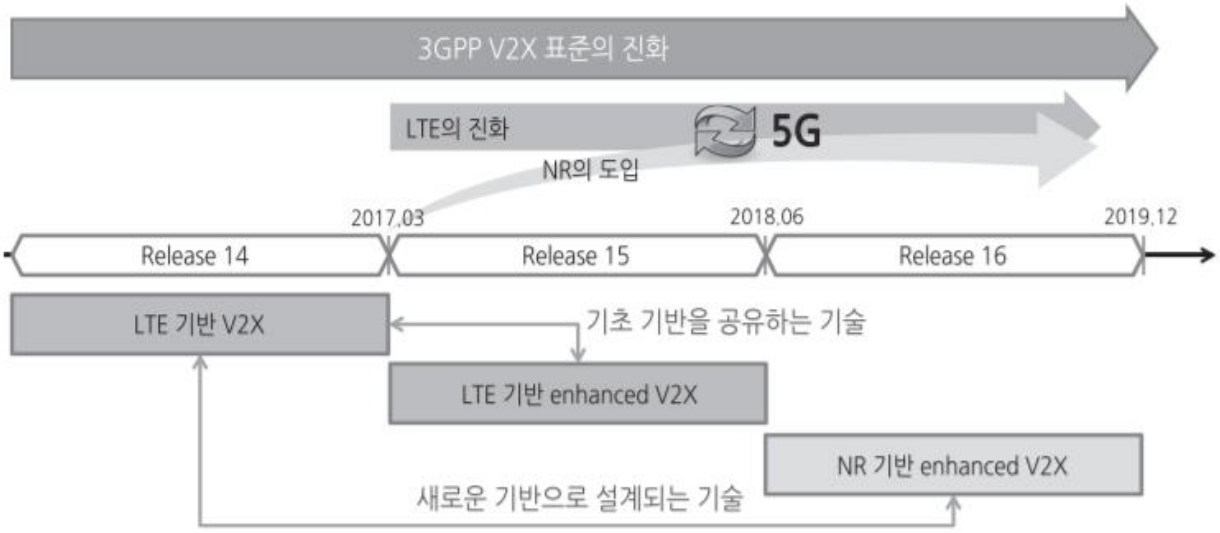
- 반송파 집계 : LTE는 최대 32 개의 반송파를 지원함. 3GPP는 LTE-V 사이드 링크를 위해 최대 8 개의 반송파의 통합을 고려하고 있음.
- 64-QAM 변조 : 릴리스 14는 QPSK 및 16-QAM을 지원함. 64-QAM은 데이터 속도를 높이고 채널 점유율을 줄일 수 있기 때문에, 3GPP는 현재 64-QAM을 도입 할 때 새로운 DMRS 체계의 필요성을 분석하고 있음.
- 도착과 출발 사이의 최대 시간 단축 : 릴리스 15에서는 이 최대 시간을 20ms (릴리스 14)에서 10ms 미만으로 줄이려고 함.
- 모드 3과 4 사이의 공유 리소스 : 두 모드는 서로 다른 RB 풀을 사용하여 독립적으로 작동 할 수 있음. 그러나 릴리스 15는 다음과 같은 가능성을 분석하고 있다. 자원 사용을 최적화하기 위해 두 모드가 공존해야 함. 이러한 공존에는 두 가지 모두에 대한 변경이 필요할 수 있다. 현재까지는 사소한 변경 사항만 논의되었음. 예를 들어 모드 3 예약에 우선 순위를 두거나 (SCI를 통해 표시됨), 또는 모드 3 전송의 SCI에 자원 예약 필드를 포함시켜서 모드 4가 이를 고려할 수 있도록 하는 방법이 있음.
- 전송 다양성 : 릴리스 15는 전송 다이버 시티 기법을 사용하여 LTE-V에서 달성 할 수 있는 타당성과 이득을 조사하고 있음. (예 : 시공간 및 주파수 블록 코딩 및 작은 지연 순환 지연 다이버 시티)
- TTI : 릴리스 15는 LTE-V의 TTI를 1ms에서 0.5ms 또는 2 개의 심볼로 줄일 수있는 가능성을 분석하고 있음. 분석 시 차량이 다른 TTI 값 (릴리스 14 및 15)은 동일한 RB 풀에 공존한다. Release 14 차량은 낮은 TTI를 사용하여 Release 15 차량을 들을 수 없음. 그러나 릴리스 15의 전송이 릴리스 14의 전송을 방해해서는 안 됨.



[자율주행 서비스를 위한 eV2X 기술]

[3GPP에서 정의한 eV2X 요구사항]

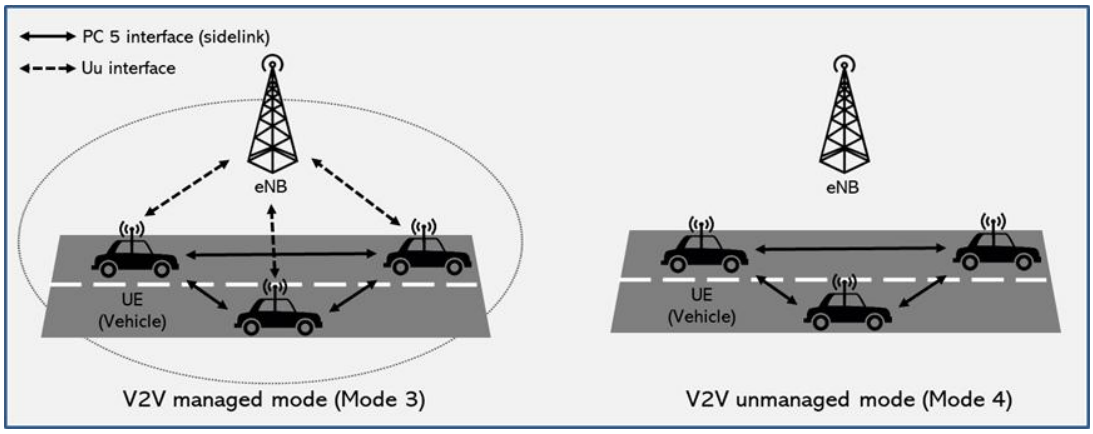
	데이터 전송률[1) 2)]	시간 지연	통신 신뢰성
군집 주행	70Kbps~65Mbps	10~25ms	90~99.99%
고도 주행	60Kbps~53Mbps	3~100ms	90~99.999%
센서 확장	120Kbps~1000Mbps	3~100ms	90~99.999%
원격 주행	상향링크: 25Mbps 하향링크: 1Mbps	5ms	99.999%



[3GPP eV2X 표준화 계획]

(가)-③ C-V2X MAC 계층

○ C-V2X의 매체 접근 제어 계층(MAC, Medium Access Control)은 기지국에서 중앙 집중식 스케줄링으로 자원을 할당하는 Mode 3와 차량간/차량과 RSU간에 예약 및 경쟁방식 기반 분산 스케줄링으로 자원을 배분하는 Mode 4 방식을 사용.



[C-V2X MAC에서의 자원 할당 방식]

○ Mode 4에서 차량은 sidelink 또는 V2V 통신을 사용하여 통신하며 셀룰러 적용 범위에 있는지에 관계없이 무선 자원(resource)을 자율적으로 선택함. 차량이 셀룰러 범위 내에 있을 때, 기지국은 V2X 채널을 구성하는 방법을 결정하고 해당 정보를 차량에게 알려줌.

○ 메시지에는 V2X 채널의 반송 주파수(Carrier Frequency), V2X 자원 풀(pool), 동기화 레퍼런스, 서브 채널화 방식, 서브 프레임당 서브 채널의 수 및 서브 채널당 RB(Resource Block)의 수와 같은 정보가 포함됨.

○ 차량이 셀룰러 적용 범위 내에 있지 않으면, 사전 구성된 파라메터를 사용하여 V2X 채널을 구성함. 그러나 표준에서는 각 파라메터에 대한 구체적인 값을 지정하지 않고 있음.

○ V2X 자원 풀은 V2X에 사용되는 채널의 subframe을 나타내며, 나머지 subframe은 셀룰러 통신을 포함한 다른 서비스에 의해 이용될 수 있음. 표준에는 지리적 영역 (Geographical Areas)을 기준으로 V2X 리소스 풀을 분할하는 옵션이 포함되어 있으며, 이 경우 한 지역의 차량은 해당 지역에 할당된 자원 풀만을 사용할 수 있음.

○ 차량은 Release 14에서 정의된 Sensing-based SPS (Semi-Persistent Scheduling) 방식을 사용하여 mode 4에서 subchannel을 선택함.

○ 차량은 subchannel을 예약할 때 같은 자원을 반복해서 사용할 수 있는 횟수인 재선택 카운터(Reselection Counter)를 설정함. 이 카운터는 [5, 15]에서 임의의 정수값에서 결정됨. 차량은 SCI(Sidelink Control Information)에 해당 값을 포함하며, 전송 후, 재선택 카운터는 1만큼 감소함.

○ 자원의 반복적인 사용으로 인한 재선택 카운터가 0이 될 경우, 차량은 미리 정해진 상수인 probResourceKeep의 확률로 같은 자원을 쓸지, 바꿀지를 결정함. 새로운 자원을 예약해야 할 때마다 재선정 카운터도 다시 설정됨. 패킷의 전송 주기는 일반적으로 100ms이며 최대 1s로 설정할 수 있음.

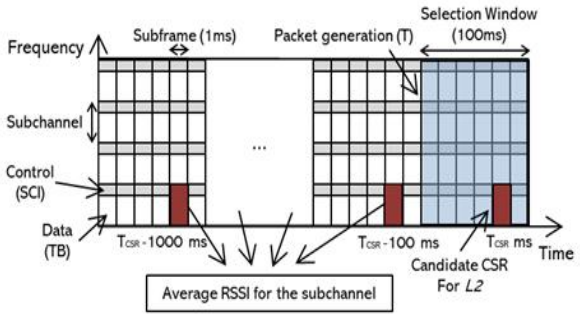
○ 각 차량은 SCI의 자원 예약 필드에 패킷 전송 주기를 포함함. SPS 방식과 SCI에 재선택 카운터 및 패킷 전송 주기를 포함함으로써 다른 차량은 자원을 예약할 때 어떤 subchannel이 사용 가능한지 예측할 수 있어 자원의 중복 선택으로 인한 패킷 충돌을 줄일 수 있음. Subchannel을 예약하는 과정은 다음과 같이 구성됨.

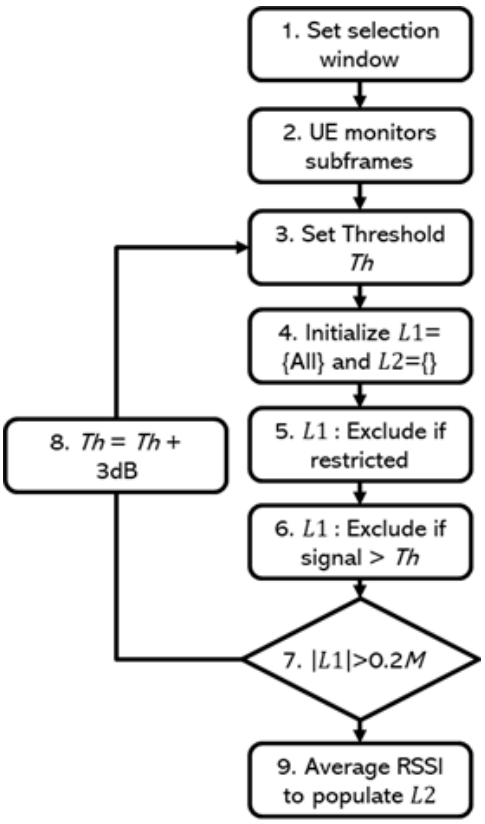
- 1 단계 : 차량 (V)이 시간 (T)에 새로운 subchannel을 예약해야 한다고 가정하면, T와 설정된 최대 대기 시간 (100ms 이하) 사이의 서브 채널을 예약할 수 있음. 이 기간을 SW(Selection Window)라고 하며, SW 내에 있는 모든 single-subchannel은 후보 자원이 되며, 차량은 사용 가능한 후보 자원을 식별함.
- 2 단계: 차량 V는 T 이전 1,000개의 subframe에서 수신한 모든 정보를 분석하고 예약할 수 있는 후보 자원 목록(L1)을 생성함. 이 목록에는 다음 두 가지 조건을 충족하는 후보 자원을 제외한 SW 내의 모든 후보 자원이 포함됨.

  ① 지난 1,000개의 subframe의 SCI 중, 해당 후보 자원이 다른 차량에 의해 사용된다고 예정하는 SCI가 있을 때

  ② A의 SCI에 해당하는 TB의 평균 Reference Signal Received Power(RSRP)가 사전에 정의한 임계값을 넘길 때

  - 후보 자원 중에서, 그 후보 자원의 100·j ms(j≤10) 이전의 subframe에 자기 차량이 신호를 송신한 적이 있었다면, half duplex 때문에, 해당 후보 자원에 대한 정보는 없다고 할 수 있음. 따라서, 이 자원들도 모두 후보 자원에서 제외됨.
  - 2단계를 수행한 후 L1은 SW 내에 있는 전체 후보자원의 20% 이상을 포함해야 함. 그렇지 않으면 20% 이상이 될 때까지 2 단계를 반복적으로 실행하며, RSRP 임계값은 반복마다 3dB씩 증가됨.
- 3 단계 : 차량 V는 후보자원의 두 번째 목록인 L2를 생성함. L2는 SW 내에 있는 모든 후보자원 중 20% 이상을 포함해야 함. L2의 후보 자원 중에서 100·j ms(1≤j≤10) 이전의 subchannel의 평균 RSSI (Received Signal Strength Indicator)가 하위 20%인 후보 자원 중 하나를 임의로 선택하여 사용할 자원을 예약하며, 자원의 반복적인 사용을 위한 재전송 카운터를 설정함.





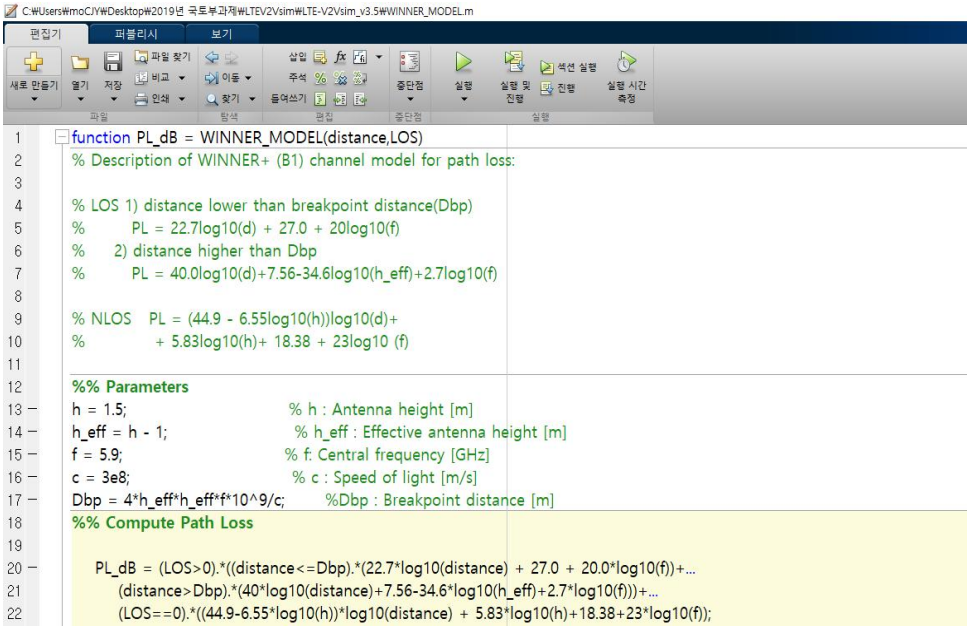
[Semi-Persistent Scheduling 흐름도]

(나) 각 계층별(무선채널/PHY/MAC) 시뮬레이터 개발

(나)-① 도심 V2V 채널 모델 시뮬레이터 개발

○ WINNER II

- 앞에서 설명한 WINNER II 모델을 Matlab으로 구현하여 LOS와 NLOS 환경에서 송수신기 거리에 따른 경로 손실 모델을 분석함. WINNER II의 평균 경로 손실 모델을 Matlab 함수로 다음과 같이 구현함.




```
function PL_dB = WINNER_MODEL(distance,LOS)
% Description of WINNER+ (B1) channel model for path loss:

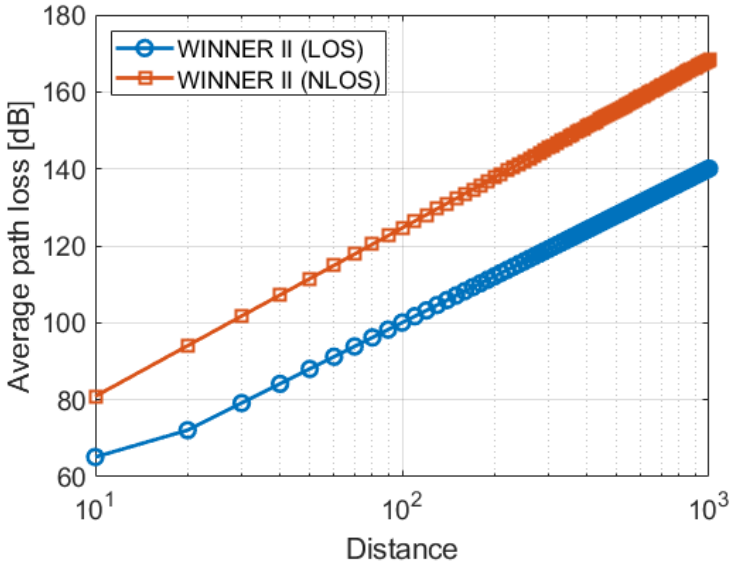
% LOS 1) distance lower than breakpoint distance(Dbp)
%        PL = 22.7log10(d) + 27.0 + 20log10(f)
%     2) distance higher than Dbp
%        PL = 40.0log10(d)+7.56-34.6log10(h_eff)+2.7log10(f)

% NLOS   PL = (44.9 - 6.55log10(h))log10(d)+
%            + 5.83log10(h)+ 18.38 + 23log10 (f)

%% Parameters
h = 1.5;                        % h : Antenna height [m]
h_eff = h - 1;                   % h_eff : Effective antenna height [m]
f = 5.9;                        % f: Central frequency [GHz]
c = 3e8;                         % c : Speed of light [m/s]
Dbp = 4*h_eff*h_eff*f*10^9/c;       %Dbp : Breakpoint distance [m]
%% Compute Path Loss

    PL_dB = (LOS>0).*((distance<=Dbp).*(22.7*log10(distance) + 27.0 + 20.0*log10(f))+...
        (distance>Dbp).*(40*log10(distance)+7.56-34.6*log10(h_eff)+2.7*log10(f)))+...
        (LOS==0).*((44.9-6.55*log10(h))*log10(distance) + 5.83*log10(h)+18.38+23*log10(f));
```

- 시뮬레이션은 V2V 환경을 고려하였으며, 송수신기 안테나 높이는 h=1.5m이고, 차량과 차량간의 거리는 최대 1000m까지 증가함.
- LOS 환경에서의 평균 경로 손실 모델은 break point d'_{BP} 기점으로 서로 다른 경로 손실 지수 값을 가지므로 그래프 상에서 기울기가 달라지는 것을 확인할 수 있음.
- 또한, NLOS 환경은 LOS 환경에 비해 동일한 송신기와 수신기간의 거리에서 평균 경로 손실이 10dB 이상 더 높다는 것을 확인할 수 있음.



[평균 경로손실 결과 그래프]

○ ITU-R 채널 모델

- ITU-R 채널 모델을 TDL (Tapped delay line) model 방식으로 Matlab으로 구현하여 NLOS 환경에서 모델을 함수로 구현
- 해당 채널 모델은 단독으로 평가가 힘들기에 PHY 링크레벨 시뮬레이터로 함께 성능 평가함.
- 채널 모델은, 고정된 파라미터만 계산할 수 있는 것이 아닌, 각 파라미터들을 조절하여 다양한 채널을 고려할 수 있도록 설계함.

Scenario UMi: NLoS clustered delay line model, urban micro-cell

Cluster No.	Delay (ns)	Power (dB)	AoD (degrees)	AoA (degrees)	Ray power (dB)	Cluster ASD = 10°	Cluster ASA = 22°	XPR = 8 dB
1	0	−6.7	31	−83	−19.8			
2	10 15 10	−4.9 −7.1 −8.9	10	54	−14.7			
3	20	−1.9	26	37	−14.9			
4	35	−6.3	−27	96	−19.3			
5	40 45 50	−3 −5.2 −7	−3	3	−13.0			
6	55	−7.5	29	−86	−20.5			
7	55	−6.4	−33	84	−19.4			
8	200	−10.8	37	−112	−23.9			
9	205	−5.2	−29	−78	−18.2			
10	250	−4.9	27	65	−17.9			
11	330	−9.2	−35	−88	−22.3			
12	440	−15.5	−48	−130	−28.5			
13	440	−16.7	−50	153	−29.7			
14	515	−12.4	−44	106	−25.5			
15	530	−16.9	46	147	−29.9			
16	580	−12.7	−45	118	−25.7			
17	590	−23.5	−59	−178	−36.5			
18	625	−22.1	60	−163	−35.1			
19	730	−23.6	56	163	−36.6			

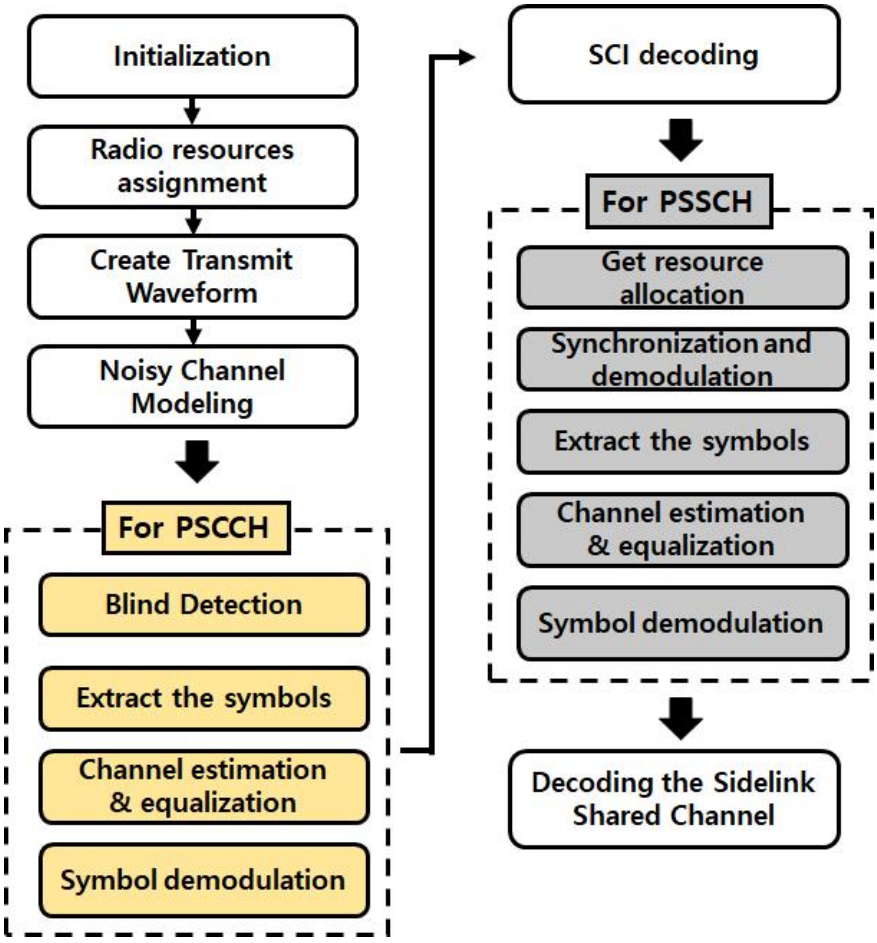
[ITU-R UMi NLoS TDL model의 delay profile]

(나)-② C-V2X PHY 시뮬레이터 개발

○ C-V2X에서는 LTE sidelink로 V2V용 표준을 정의하고 있음.

○ LTE sidelink는 컨트롤 채널인 PSCCH (physical sidelink control channel)과 데이터 전송 채널인 PSSCH (physical sidelink shared channel)을 구분하여 전송함.

○ 아래의 구조에 맞추어 Matlab을 이용하여 구현하였음.



[LTE 사이드링크 링크레벨 시뮬레이터 구조]

- Initialization : 채널생성 파라미터, 유저 파라미터를 포함한, 듀플렉스, 모듈레이션 및 전반적인 시뮬레이션 셋팅을 설정함.
- Radio resources assignment : 시뮬레이션에서 사용하는 PSSCH (Physical Sidelink Shared Channel), PSSCH (Physical Sidelink Control Channel)를 각 리소스 엘리먼트에 할당하는 작업, PSSCH (Physical Sidelink Shared Channel), PSSCH (Physical Sidelink Control Channel)는 적응형 할당과 비적응형 할당으로 선택할 수 있음.
- Create Transmit Waveform : 유저 파라미터에 의해 생성된 데이터를 물리 계층 단계로 전달하여, PSCCH 및 PSSCH 물리 채널 및 DRS 신호를 포함하는 SC-FDMA 변조 파형을 생성
- Noisy Channel Modeling : ITU-R 또는 Winner 채널 모델의 페이딩 채널을 통해 전송 웨이브폼을 전달하고 노이즈를 추가함.
- For PSCCH : 이 단계에 포함되는 모든 과정들은 PSCCH (Physical Sidelink control Channel)에만 해당함.

- ✓ Blind Detection : 모든 cyclic shift에 대해 PSCCH resource block pool에 설정된 각각의 PRB에 대해 동기화, 채널 추정 및 디코딩을 수행하는 단계. 이 과정에서 DM-RS (demodulation-reference signal) correlation 의 가장 높은 피크를 기준으로 동기화를 위한 타이밍 offset을 맞추기 위해 사용함.
- ✓ Extract the Symbols : 서브 프레임의 PSCCH가 할당된 리소스 그리드로부터 PSCCH indices를 통해 PSCCH symbol을 추출하는 단계
- ✓ Channel estimation & equalization : 채널 PSSCH의 채널 복호화를 위해 잡음 전력의 추정치를 계산하고 MMSE 방식으로 복호화 하는 단계
- ✓ Symbol demodulation : 복호화된 PSCCH의 QPSK symbol을 복조하는 단계

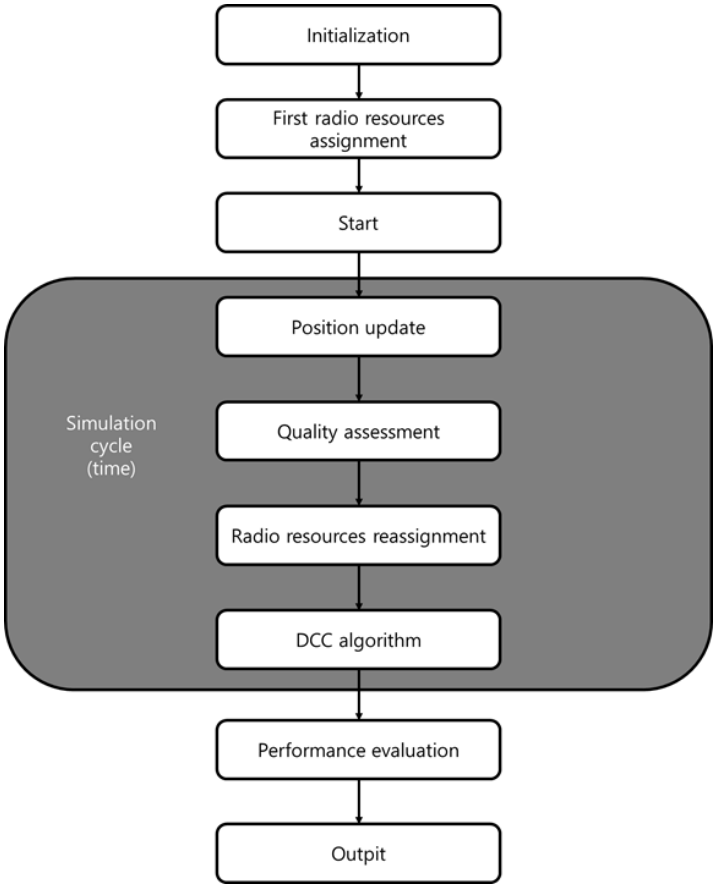
- SCI decoding : 이 과정은 SCI를 디코딩 하는 과정이다. SCI 값 중에 디코딩 된 CRC값이 0이고 복구된 CRC mask가 예상 값이면 SCI 디코딩은 성공적인 것으로 간주되고, CRC mask에는 PSSCH 스크램블링 ID, Sidelink 그룹 분포 정보 등이 포함되어 있다. 이 과정에서 SCI 디코딩이 실패한다면, 서브프레임은 제대로 수신 받지 못한 것으로 간주하여 더 이상의 추가 처리는 수행되지 않음.
- For PSSCH : 이 단계에 포함되는 모든 하위과정들은 PSSCH (Physical Sidelink Shared Channel)에만 해당함.
  - ✓ Resource allocation : 복구된 SCI 메시지로부터 RIV (resource indication value) 값을 디코딩하고, 그 값을 이용하여 sidelink shared channel의 subframe의 리소스 그리드 인덱스를 얻음.
  - ✓ Synchronization and Demodulation : PSSCH의 서브프레임의 동기화 및 SC-FDMA 복조를 수행하는 단계. Control channel과 shared channel이 동일한 서브프레임이 전송되는 경우에는 동기화 부분을 생략하고, 그렇지 않은 경우에만 동기화를 수행함.
  - ✓ Extract the symbols : 위의 동기화, 복조된 신호 중에 PSSCH 신호만을 추출함.
  - ✓ Channel estimation & equalization : 채널 PSSCH의 채널 복호화를 위해 잡음 전력의 추정치를 계산하고 MMSE 방식으로 복호화하는 단계
  - ✓ Symbol demodulation : UE 셋팅에 따라서, PSSCH의 변조는 QPSK, 16QAM, 64QAM을 지원하고 송신단에서 변조된 방식에 따라서 복조하는 단계

(나)-③ C-V2X MAC 시뮬레이터 개발

○ C-V2X MAC 계층은 기지국에서 중앙 집중식 스케줄링으로 자원을 할당하는 Mode 3와 차량간/차량과 RSU간에 예약 및 경쟁방식 기반 분산 스케줄링으로 자원을 배분하는 Mode 4 방식을 사용함.

○ Mode 3에서는, 차량에서 기지국으로 자원할당을 요청하고 다시 할당하는데 시간 지연이 상당히 발생하기 때문에, 저지연을 요구하는 협력자율주행에서는 저지연 특성을 갖는 Mode 4 기반의 메시지 전송이 필수적임. 따라서 C-V2X MAC의 Mode 4의 SPS (Semi-Persistent Scheduling)을 Matlab으로 구현함.

○ Mode 4의 SPS 방식을 포함한 전체적인 C-V2X MAC 시뮬레이터는 Matlab을 이용하여 제작되었으며, 시뮬레이션 tool의 블록 다이어그램은 다음과 같음.



[C-V2X MAC 시뮬레이터 흐름도]

- Initialization : 서비스 운용 환경, 차량 밀도, 메시지 크기와 같은 기본적인 시뮬레이션 파라메터를 설정함.
- First radio resources assignment : 차량이 V2X 자원 풀(pool)에서 사용 가능한 자원들을 할당받는 단계로써 시나리오상에 있는 모든 차량에 대해 수행됨.
- 1, 2단계 이후에 시뮬레이션은 주기에 따라 Position update, Quality assessment, Radio resources reassignment 및 DCC algorithm 네 단계를 설정한 시뮬레이션 시간까지 반복적으로 수행됨.
- Position update : 시뮬레이션 주기와 차량의 속도에 맞춰 이동 거리를 계산하여 모든 차량의 위치를 업데이트함.
- Quality assessment : 이전 주기에 할당된 자원을 사용하여 수행된 송신에서, 메세지 송신의 성공 여부를 평가하며 메세지 수신 실패는 SINR(signal to noise and interference ratio)에 따라 결정됨. 특히, 차량 i에서 차량 j로 전송된 패킷의 SINR γ_{ij}가 최소 임계값 $\gamma_{\min}$보다 낮을 경우 메시지에 에러가 발생한 것으로 판단함.
- Radio resource reassignment : 자원을 할당받지 못한 차량과 재선택 카운터가 0인 차량에 대하여 자원을 재할당함. 앞서 설명한 Mode 4의 SPS 방식이 수행되며, 차량은 L2의 후보 자원 중에서 평균 RSSI가 하위 20%인 후보 자원 중 하나를 임의로 선택함.
- DCC algorithm : CBR(Channel Busy Ratio)과 CR(Channel Occupancy Ratio)을 측정하여 채널 혼잡도를 판단한 후, 채널이 혼잡하다고 판단되면 구현된 분산혼잡제어(Decentralized Congestion Control) 알고리즘을 수행함. 이는 다음 시뮬레이션 주기에서 수행되는 송신에 영향을 주며, 이 단계에서 개발하는 V2X 네트웍 분산혼잡제어 기술을 구현하고 마지막 단계에서 성능 평가가 이루어짐.
- Performance evaluation : 시뮬레이션 결과를 분석하며, 채널 혼잡 상황에서 핵심 성능 지표로 활용될 수 있는 PDR (Packet Delivery Ratio)과 IPG (Inter-packet gap)를 도출하고 평가함.

(다) 각 계층별(PHY/MAC) 시뮬레이터 성능 검증

(다)-① C-V2X PHY 시뮬레이터 성능 검증

○ 3GPP R1-160284[10] 문서에서 Huawei, HiSilicon이 수행한 PHY 시뮬레이터와 동일 채널모델의 개발한 링크레벨 시뮬레이터와의 성능비교함.

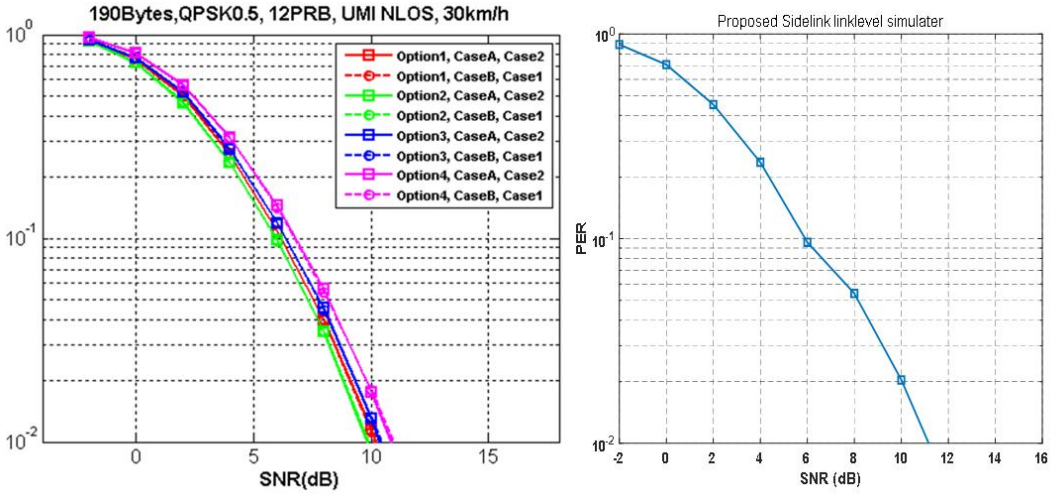
○ 시뮬레이션 환경

- 시뮬레이션 환경은 3GPP R1-160284 문서와 개발한 시뮬레이터가 동일한 환경에서 구성되어 있음.
- 시뮬레이션 파라미터는 다음과 같음.

Parameters	Assumptions
General parameters:	
System bandwidth	10 MHz
Carrier frequency	6 GHz
Channel model	ITU-R UMi NLOS
Antenna configuration	1 antenna @ transmitter 2antennas@receiver
UE relative speed	30 km/h
Number of transmissions	1
Frequency offset estimation	time domain
Channel estimation	Linear interpolation
PSSCH parameters:	
TBS	190 bytes
Modulation	QPSK,
Coding rate	1/2 QPSK
PSCCH parameters:	
TBS	43 bits
Modulation	QPSK
PRB number	1

○ 시뮬레이션 결과

- 참조문서의 결과 (a)의 경우 케이스가 여러 개로 나누어 져 있는데, option은 DM-RS의 배치의 차이를 나타내고, Case A,B는 동기화 에러의 가정방식, Case 1,2는 주파수 에러의 양에 대한 가정을 나타냄.
- 제안한 C-V2X PHY 시뮬레이터의 경우 동기화 에러를 특별하게 가정하지 않고, 디자인된 송수신 패킷간의 동기화 과정을 직접 실행함으로 인하여 참조문서 보다 좀 더 정확한 동기화 에러 양을 계산함.
- 문서의 PER결과와 개발한 시뮬레이터를 이용하여 얻은 PER결과를 비교
- 정확도는 PER 오차의 RMSE 값을 구하여 3GPP R1-160284 그래프의 최소 값과 최대 값을 기준으로 각각 1.62%, 7.8% 오차로 정확도 90%이상을 달성하였음.



(a) R1-160284 문서의 PER (b) 제안 모델의 PER 성능

[C-V2X PHY 시뮬레이터의 PER 성능]

기준 SNR (dB)	3GPP R1-1610284 PER (%)		제안한 C-V2X PHY 시뮬레이터 PER (%)	오차 (%)	
	최소값	최대값		최소값	최대값
-2	91	97	88.8	2.2	8.2
0	73	81	70.8	2.2	10.2
2	47	58	45.2	1.8	12.8
4	23.5	31.5	23.6	-0.1	7.9
6	9.7	15.5	9.6	0.1	5.9
8	3.6	5.5	5.4	-1.8	0.1
10	0.9	1.8	2.4	-1.5	-0.6

최소값 오차의 RMS = 1.62 %, 최대값 오차의 RMS = 7.8%

[정확도 비교 결과]

(다)-② C-V2X MAC 시뮬레이터 성능 검증

○ 개발한 C-V2X MAC 시뮬레이터 성능 검증을 위해 3GPP R-1611594 문서[11]에서 Qualcomm이 진행한 분산혼잡제어 알고리즘에 대한 성능 그래프와 개발한 C-V2X MAC 시뮬레이터를 이용하여 얻은 결과 그래프를 비교 분석하여 시뮬레이터의 성능 검증을 진행함.

○ 3GPP R-1611594에서는 구체적인 혼잡제어 알고리즘을 명시하진 않지만, CR(Channel-occupancy ratio)에 따른 프레임 웍을 제안함.

○ 제안한 분산혼잡제어 프레임 웍은 각 차량에서 측정된 CBR이 속한 구간에 따라 각 차량이 사용할 수 전파자원의 최대치(CRlimit)를 매핑하는 방식을 사용하고 측정된 CR 값이 CRlimit보다 작을시, 지정된 혼잡제어 알고리즘을 수행하는 방식임.

○ 먼저, 각 차량의 V2X 수신기가 사용 가능한 주파수와 시간 차원의 전체 전파 자원 중에서, 수신 신호의 강도를 나타내는 RSSI(Received Signal Strength Indicator)가 정해진 기준을 초과하는 전파자원의 비율을 CBR로 측정함.

○ 이렇게 측정된 CBR 값을 이용하여 경쟁하고 있는 차량의 수, Nsta를 다음 식과 같이 추정.

$$Nsta = f(CBR)$$

○ CBR이 나타내는 채널 사용도는 전파 자원을 이용하여 V2X 통신을 수행하는 차량 수와 비례하기 때문에, Nsta는 CBR을 입력 값으로 하는 임의의 함수 f()로 표현할 수 있음.

○ 각 차량이 사용할 수 있는 채널 용량의 최대치 CR_{limit}은 전파자원 총량의 최대치인 CR_{total_limit}을 Nsta로 나누며 다음과 같이 구할 수 있음.

$$CR_{limit} = CR_{total\_limit}/Nsta$$

○ 따라서, 측정된 CBR을 이용하여 각 차량이 사용할 수 있는 채널 용량의 최대치 CR_{limit}을 결정함,

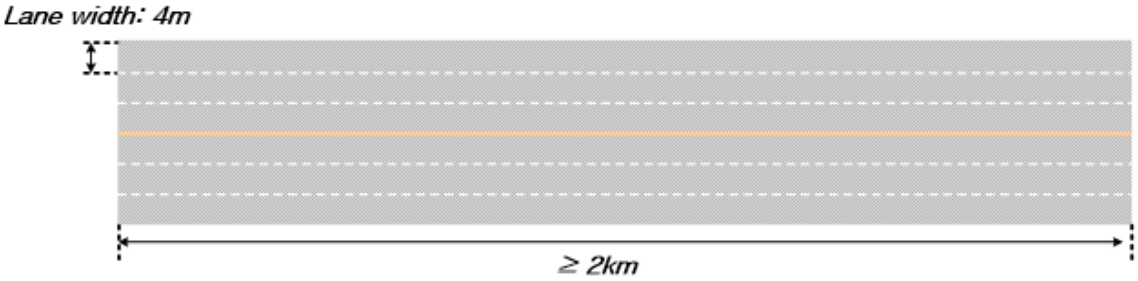
○ 마지막으로, 각 차량에서 독립적으로 CR을 측정하여, CR_{limit} 보다 작을 시 지정된 분산혼잡제어 알고리즘을 수행함.

○ 임의의 함수 f()를 사용하면 CBR에 따른 CR_{limit}를 사전에 구성할 수 있음. 문서에서는 메시지 주기가 10Hz 일 때, 사전 구성된 CR_{limit} 표를 제공함.

(다)-②-1. 시뮬레이션 환경

○ 다음과 같은 시뮬레이션 환경을 설정하고 분산혼잡제어의 적용 여부에 따른 성능 변화를 살펴봄.

- mobility model
  - ✓ 고속도로 환경을 가정
  - ✓ 차량은 random하게 도로상에 위치
  - ✓ 차량 수를 369, 554, 738대로 변화시킴. 이는 차량 밀도가 높아짐에 따른 분산혼잡제어 성능 변화를 살펴보기 위함.



- Channel model
  - ✓ WINNER II에서의 경로 손실 모델을 사용.
  - ✓ 고속도로 환경이므로, LOS 경로손실 모델을 적용함.
- 혼잡제어 알고리즘
  - ✓ 기본적인 혼잡제어 메커니즘 중, 문서에서 사용한 방법인 packet dropping 방법을 적용함.
  - ✓ Packet dropping 은 측정된 CR이 CRlimit 보다 낮을 시 적용함.
  - ✓ CBR 측정 window : 100ms
  - ✓ CR 측정 window : 1000ms
  - ✓ CBR 임계값 : -107 dBm
  - ✓ CBR_{limit}: 0.65
    CBR에 따른 CR_{limit}은 3GPP R-1611594 문서에서 정의한 CR_{limit} 표를 사용함.
  - ✓ 각 차량은 분산 방식(decentralized way)으로 CBR을 측정함.

CBR measured	CR limit
CBR ≤ 0.650	No limit
0.650 < CBR ≤ 0.675	1.6e-3
0.675 < CBR ≤ 0.700	1.5e-3
0.700 < CBR ≤ 0.725	1.4e-3
0.725 < CBR ≤ 0.750	1.3e-3
0.750 < CBR ≤ 0.800	1.2e-3
0.800 < CBR ≤ 0.825	1.1e-3
0.825 < CBR ≤ 0.850	1.0e-3
0.850 < CBR ≤ 0.875	0.9e-3
0.875 < CBR	0.8e-3

- 그 외 파라메터 값

✓ 자원할당방식 : Mode 4(SPS)

Parameter	Value
Standard version	LTE-V2X Rel-14
Adjacent of PSSCH-PSCCH	Enabled
Number of subchannels	2
Channel size	50 RB
Subchannel size	18 RB
MCS index	4
HARQ retransmission	disable
Transmission power	23 dBm
Noise Figure	9 dB
RSRP threshold	-110 dBm
Message Size	190 bytes
Message Tx rate	10 Hz

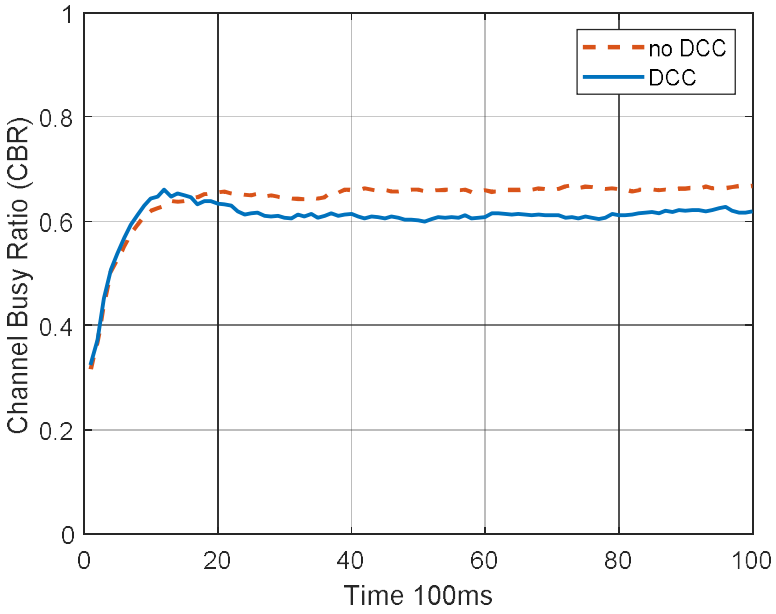
(다)-②-2. 시뮬레이션 결과

- 차량 밀도 : 369대, 속도: 70km/h (낮은 밀도)

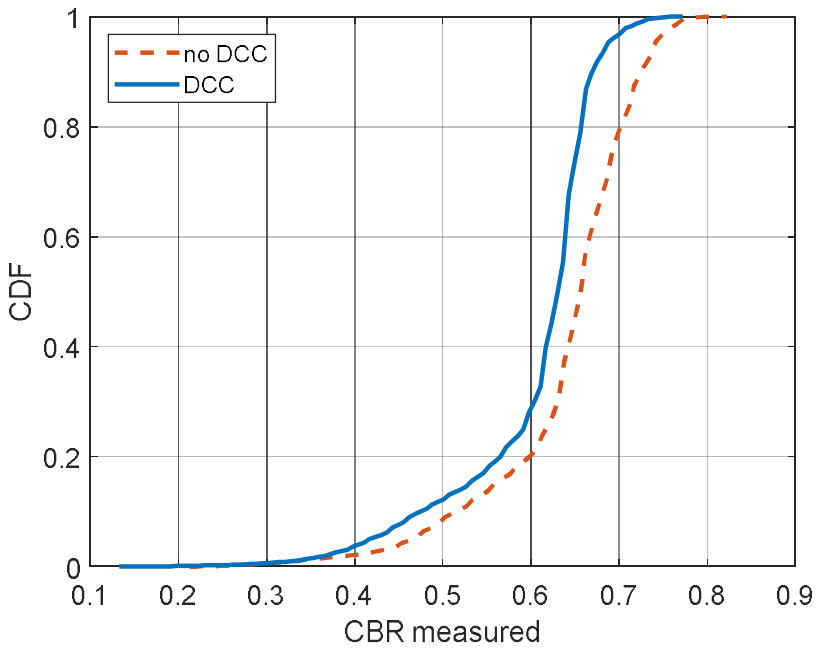
✓ 시간에 따른 CBR과 측정된 CBR의 CDF를 보면, 밀도가 작을 시 분산혼잡 제어를 적용해도 CBR 값의 차이가 크지 않음.

✓ 또한, PDR (Packet delivery ratio) 성능 차이가 발생하지 않는 것을 확인할 수 있음.

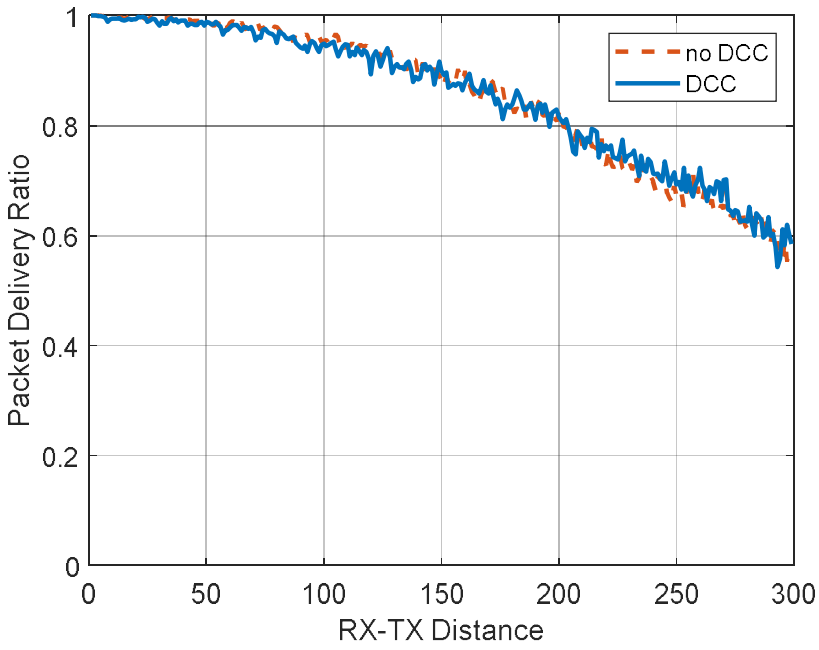
✓ 이는 시나리오상의 차량 밀도에 의해 채널 부하가 크지 않기 때문에 발생하는 현상으로 네트워크의 채널 용량이 시나리오상의 차량들을 충분히 수용할 수 있음을 의미함.



[CBR VS 시간 (with/without DCC)]



[측정된 CBR의 CDF (with/without DCC)]



[PDR vs 거리 (with/without DCC)]

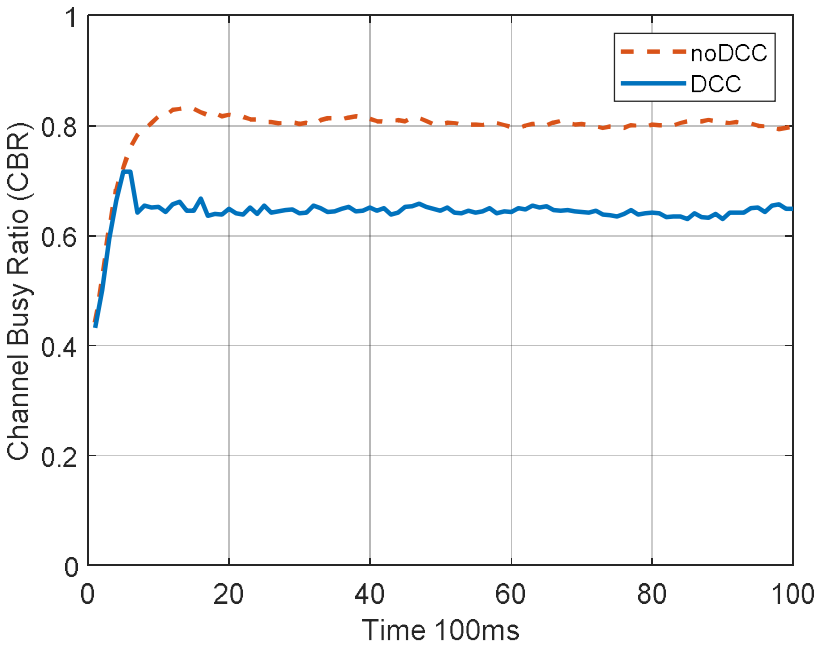
- 차량 밀도 : 554대, 속도: 70km/h (중간 밀도)

✓ 분산혼잡 제어를 수행한 시간에 따른 CBR을 보면, 이전 결과와 달리 CBR이 15% 정도 차이를 보임. CDF도 이전 결과에 비해 낮은 분포를 보이며, 이는 분산혼잡 제어 알고리즘이 잘 작동하고 있다는 것을 의미함.

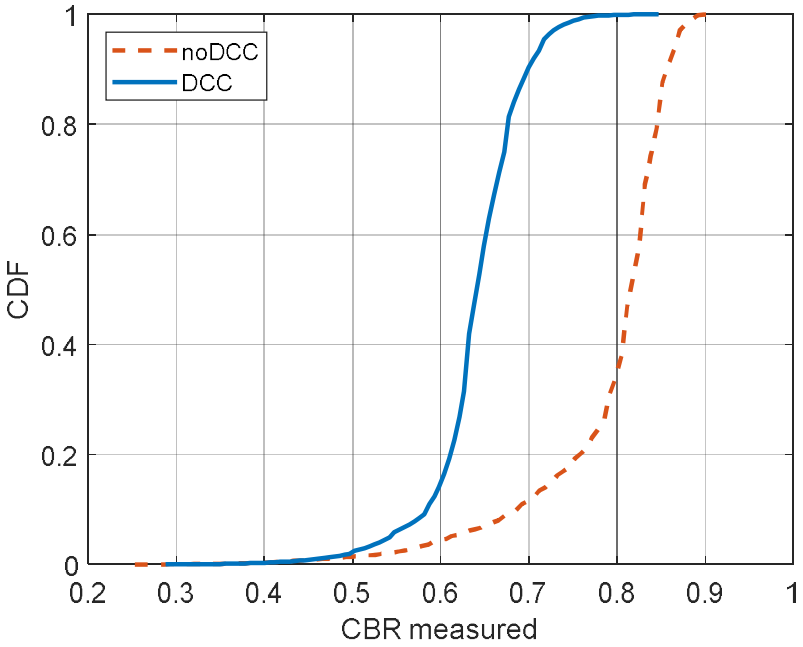
✓ 분산혼잡 제어를 사용했을 때, 값이 0.65에 수렴하는 것을 볼 수 있음. 이는 시뮬레이션 환경에서 CBRlimit를 0.65로 설정하였기 때문임.

✓ 또한, PDR (Packet delivery ratio) 성능에서도 차이가 발생함.

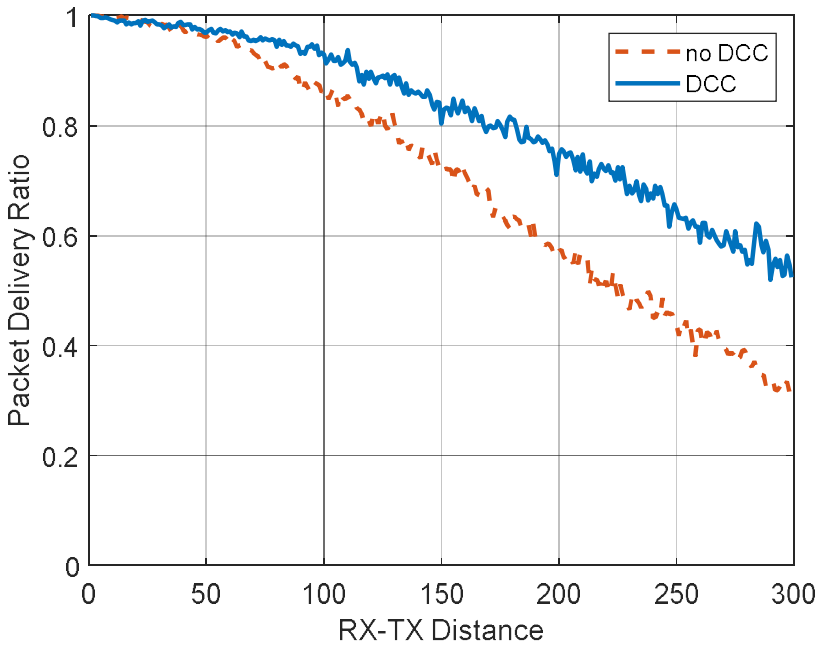
✓ 이는 시나리오상의 차량 밀도에 의해 채널 부하가 커져 분산혼잡 알고리즘이 수행되고 이로 인해 채널 혼잡이 완화되어 성능 향상이 발생함.



[CBR VS 시간 (with/without DCC)]



[측정된 CBR의 CDF (with/without DCC)]



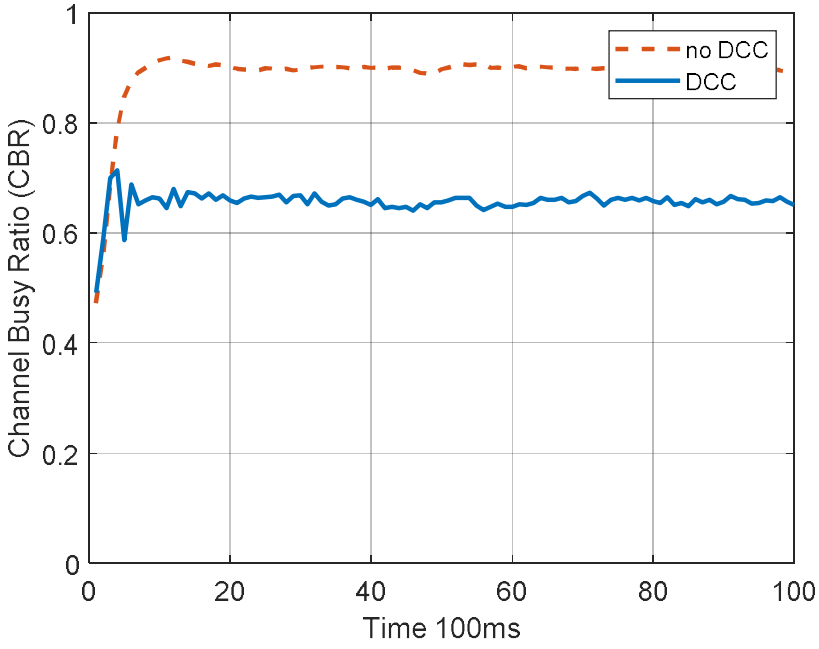
[PDR vs 거리 (with/without DCC)]

- 차량 밀도 : 738대, 속도: 70km/h (높은 밀도)

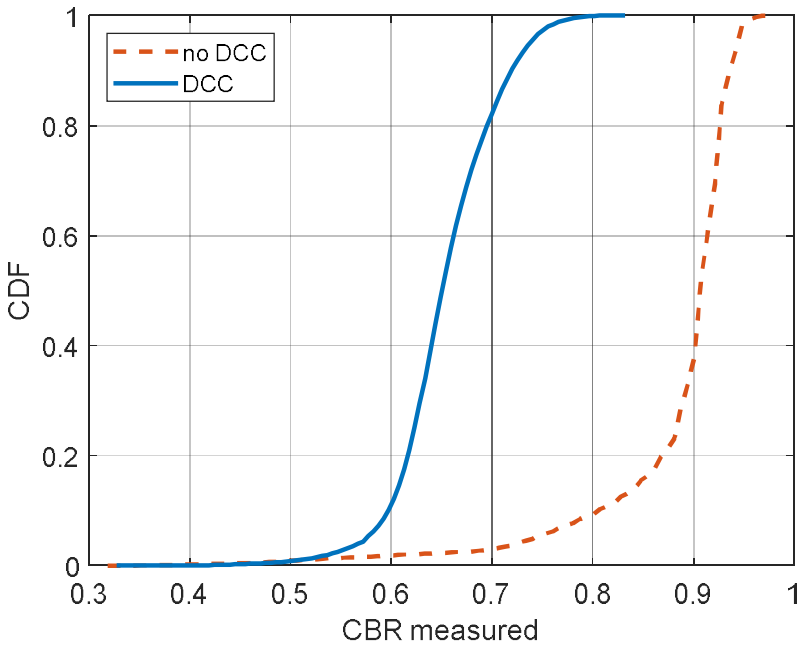
✓ 분산혼잡 제어를 적용하지 않았을 때, 높은 밀도에서 CBR이 90% 근접함을 볼 수 있음.

✓ 높은 밀도에서 분산혼잡 제어를 사용 시, PDR 성능은 가장 큰 차이를 보임.

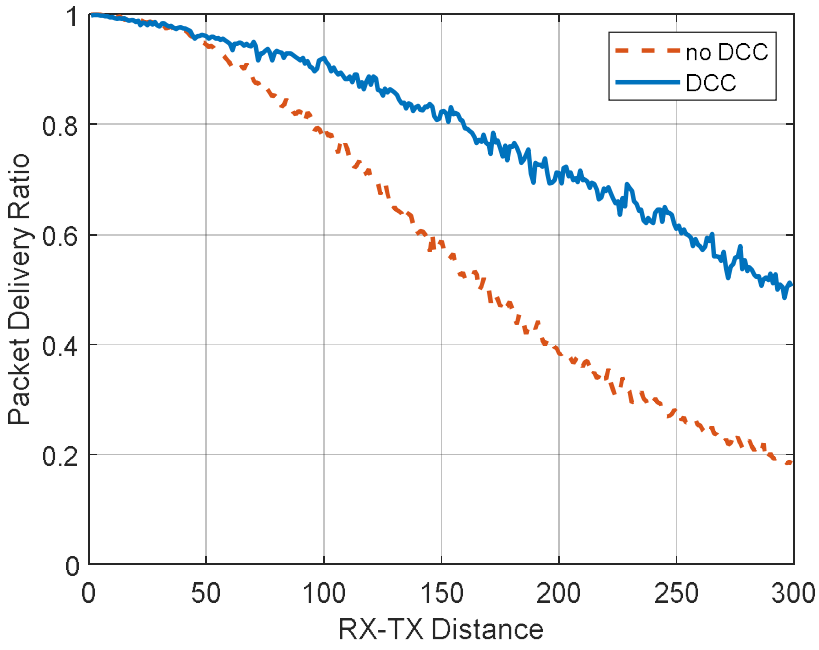
✓ 고 밀도 시나리오일수록 분산혼잡 제어의 효과가 가장 크게 나타남.



[CBR VS 시간 (with/without DCC)]



[측정된 CBR의 CDF (with/without DCC)]



[PDR vs 거리 (with/without DCC)]

- 3GPP R1-16511594 결과와 비교 분석

✓ 아래의 결과 그래프에서 첫 번째 결과는 참고 문서의 결과 그래프이며, 두 번째 결과는 개발한 시뮬레이터를 이용하여 얻은 결과 그래프임.

✓ 문서상에 나와 있는 시뮬레이션 환경과 최대한 동일하게 설정하였으며, 세부적인 설정으로 인하여 값이 약간 달라질 수 있음.

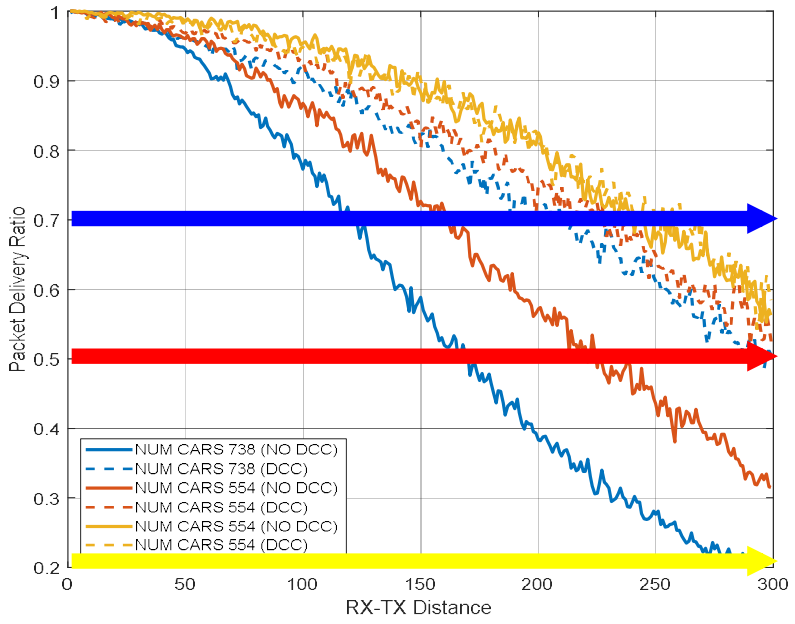
✓ 분산혼잡 제어를 적용했을 때, PDR 값에 매칭되는 거리를 정확도 기준으로 정함.

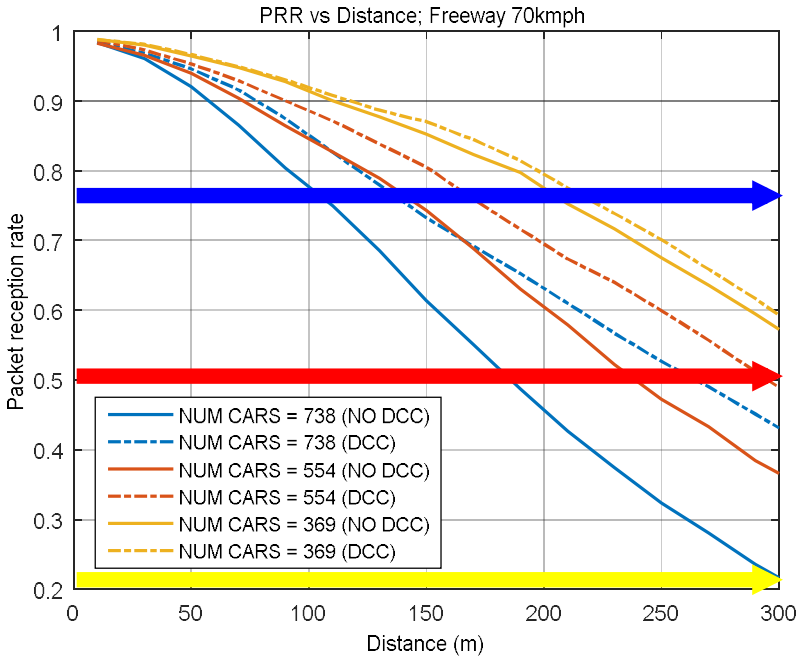
✓ 아래표는 PDR값과 밀도의 변화에 따른 정확도를 나타냄.

✓ 참고문서의 결과와 개발한 시뮬레이터의 결과에 큰 차이는 없으며 91% 이상의 높은 정확도를 보임.

PDR	밀도	R1-16511594 Distance	개발한 시뮬레이터 Distance	정확도 (%)
0.7	738	125	120	96
	554	165	160	97
	369	240	240	100
0.5	738	180	165	91
	554	240	230	95
	369	x	x	x
0.2	738	300	280	93
	554	x	x	x
	369	x	x	x

[정확도 비교 결과]





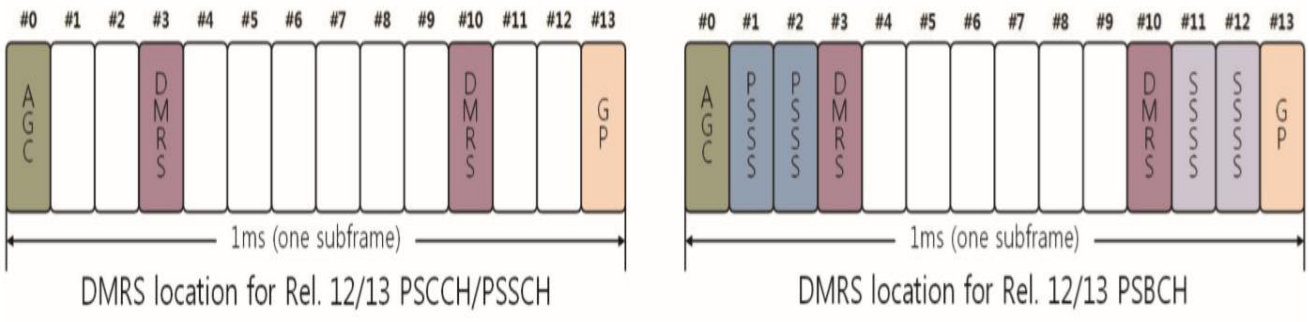
[PDR vs 거리 (with/without DCC)]

(라) 무선채널 & PHY 시뮬레이터와 MAC 시뮬레이터 통합

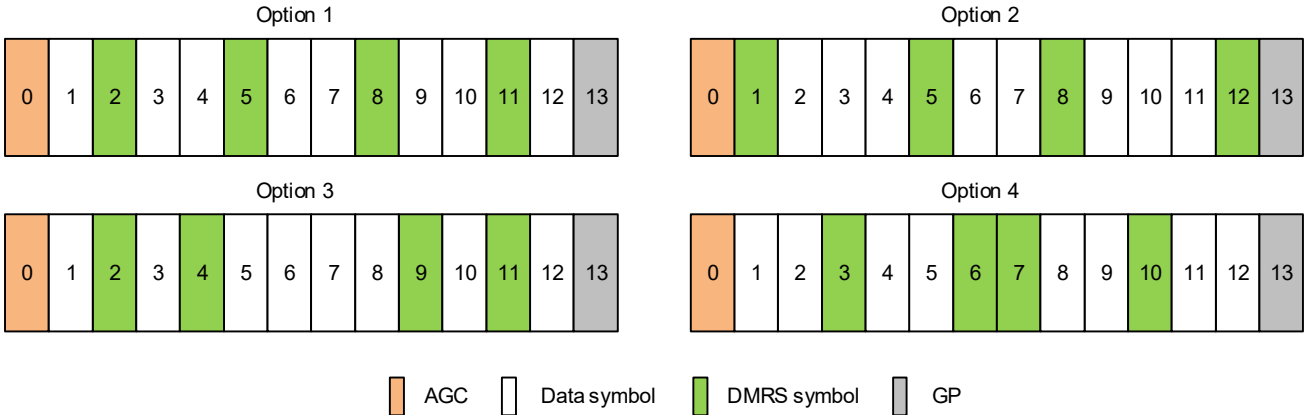
(라)-① 무선채널 & PHY 시뮬레이터

○ C-V2X PHY layer

- C-V2X PHY layer(Rel.14)의 구조는 D2D(Rel.12/13)에서 2개였던 DMRS신호를 4개로 배치하여 설계 (3GPP R1-160284[10])
- DMRS신호의 추가 배치는 빠른 채널 변화에도 채널 추정이 용이하게 함.

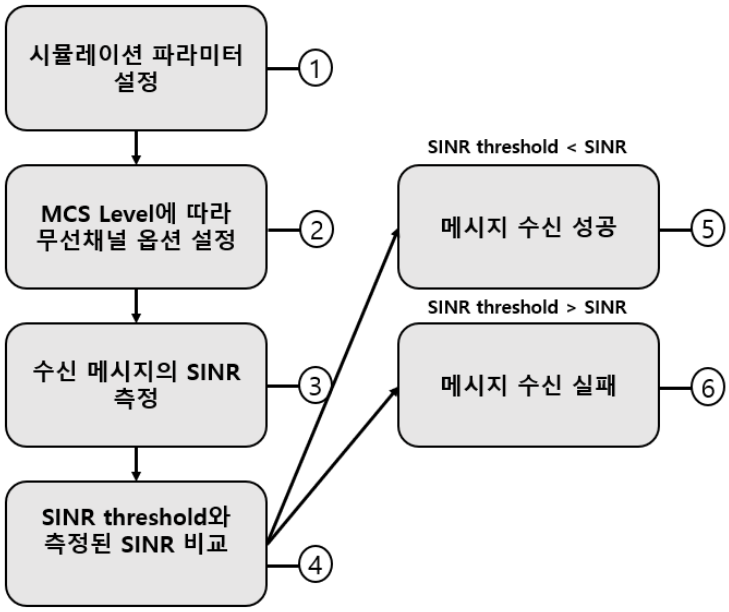


[D2D통신 PHY layer design]



[C-V2X PHY layer design]

- 기존 C-V2X Mode 4 V2V 시뮬레이터는 PHY layer에 초점을 두고 있으며, MAC layer의 BLER curve는 고려되지 않음.
- 기존 시뮬레이터의 동작 알고리즘은 다음 순서도와 같음.



[기존 PHY layer 시뮬레이터 동작 알고리즘]

① 시뮬레이션 동작에 필요한 파라미터 값을 입력. ex) 시뮬레이션 동작 시간, 전송전력, 차량밀도, 비콘메시지 주기, MCS level 등

② 시뮬레이션 파라미터 중 MCS level의 선택에 따라 무선 채널의 옵션이 정해지며, 이 옵션 중에는

MCS #	Modulation, Coding Rate	RB Pairs	Min. SINR[dB]	Range[m] (only PL)	Subch. Size	Packets Per TTI
0	QPSK, 0.13	86	-2.83	418	5	-
1	QPSK, 0.17	66	-1.38	411	5	-
2	QPSK, 0.21	54	-0.22	404	5	-
3	QPSK, 0.27	41	1.49	392	5	1
4	QPSK, 0.33	34	2.76	382	6	1
5	QPSK, 0.41	28	4.40	365	5	1
6	QPSK, 0.48	23	5.79	354	5	2
7	QPSK, 0.57	20	7.30	336	6	2
8	QPSK, 0.65	18	8.60	320	5	2
9	QPSK,0.73	16	9.88	306	6	2
10	QPSK, 0.82	14	11.16	294	6	2
11	16QAM, 0.41	14	11.16	294	6	2
12	16QAM, 0.46	12	12.83	278	5	3
13	16QAM, 0.52	11	14.46	258	5	3
14	16QAM, 0.59	10	16.39	237	6	4
15	16QAM, 0.67	9	18.73	213	6	4
16	16QAM, 0.72	8	20.05	203	5	5
17	16QAM, 0.75	8	21.10	191	5	5
18	16QAM, 0.84	7	23.54	172	5	5
19	16QAM, 0.92	7	25.93	150	5	5
20	16QAM, 1.00	6	28.10	137	5	5

[MCS Table]

SINR threshold 값도 포함됨.

③ 파라미터 설정에 따라 시뮬레이션은 초기화되고, 각 수신 메시지들의 SINR 값이 계산됨. 현재 시뮬레이

터는 half-duplex mode로 설계되었기 때문에 K_{si}값은 0

$$SINR_{xy} = \frac{(P_{tx} \cdot G_{rx})/(PL \cdot {D_{xy}}^{\beta})}{(K_{si} \cdot P_{tx} + P_n) + \sum_{\substack{k \epsilon K_n \\ k \neq y}} (P_{tx} \cdot G_{rx})/(PL \cdot {D_{ky}}^{\beta})}$$

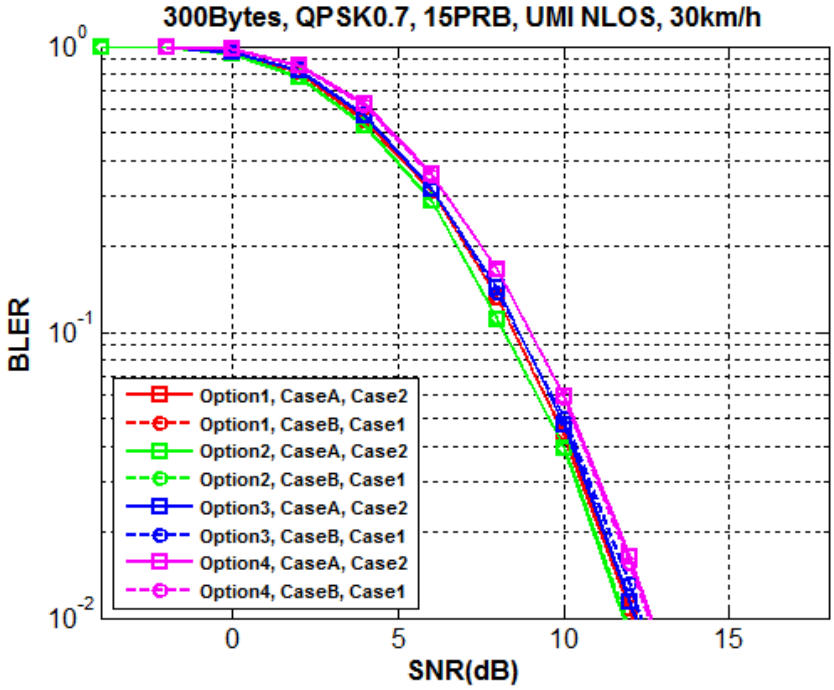
P_{tx} = 전송 전력
G_{rx} = 수신 안테나 이득
PL = 경로 손실
D_{xy}= 송·수신 사이 거리
β = 손실 지수
K_{si} = 자기 간섭 파라미터$K_{si} \in [0,1]$
K_n = 동일 서브채널의 차량

[SINR 계산]

④ 측정된 수신 SINR 값과 MCS에 따라 정해지는 SINR threshold 값을 비교
⑤ 수신 SINR 값이 SINR threshold 값보다 크면, 메시지는 성공적으로 수신
⑥ 수신 SINR 값이 SINR threshold 값보다 작으면, 메시지는 수신 실패

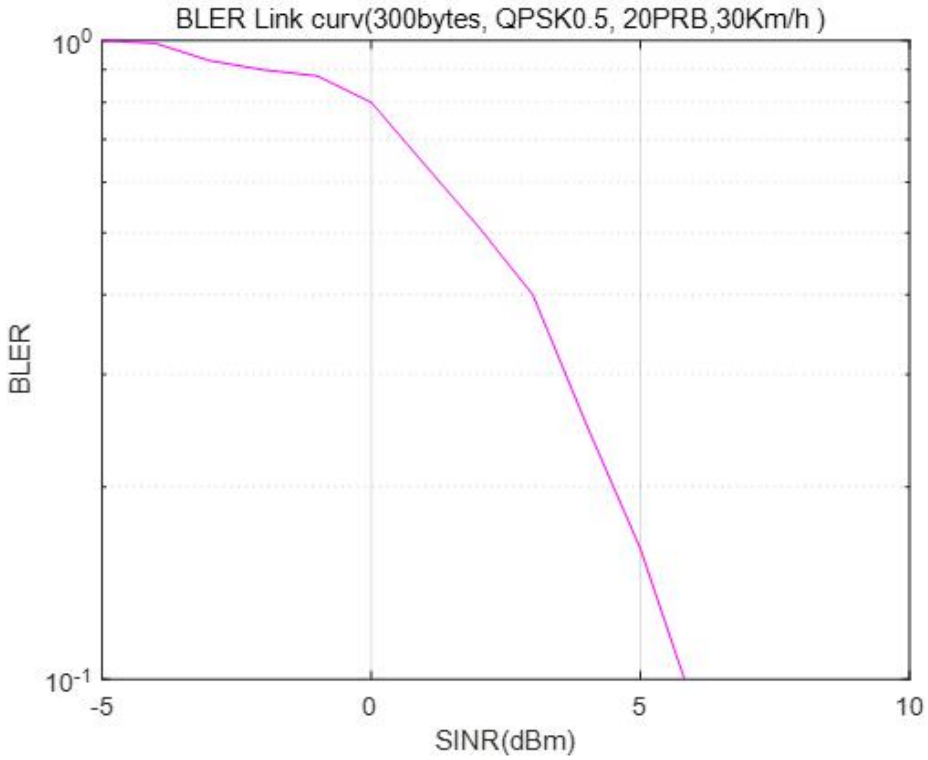
(라)-② 무선채널 & PHY 시뮬레이터와 MAC 시뮬레이터 통합

○ 무선채널 & PHY 시뮬레이터에 MAC layer의 BLER Curve를 적용하기 위해 3GPP R1-160284 문서를 참고



[시뮬레터에 적용한 BLER Curve]

○ 위의 옵션 중 option4, caseB, case2의 BLER curve를 채택했으며, 그림에 보이지 않는 영역의 값은 선형적으로 계산하여 적용



[시뮬레이터에 적용된 BLER curve]

○ 무선채널 & PHY 시뮬레이터와 통합한 시뮬레이터의 결과를 동등하게 비교 분석하기 위해 다음 파라미터를 이용

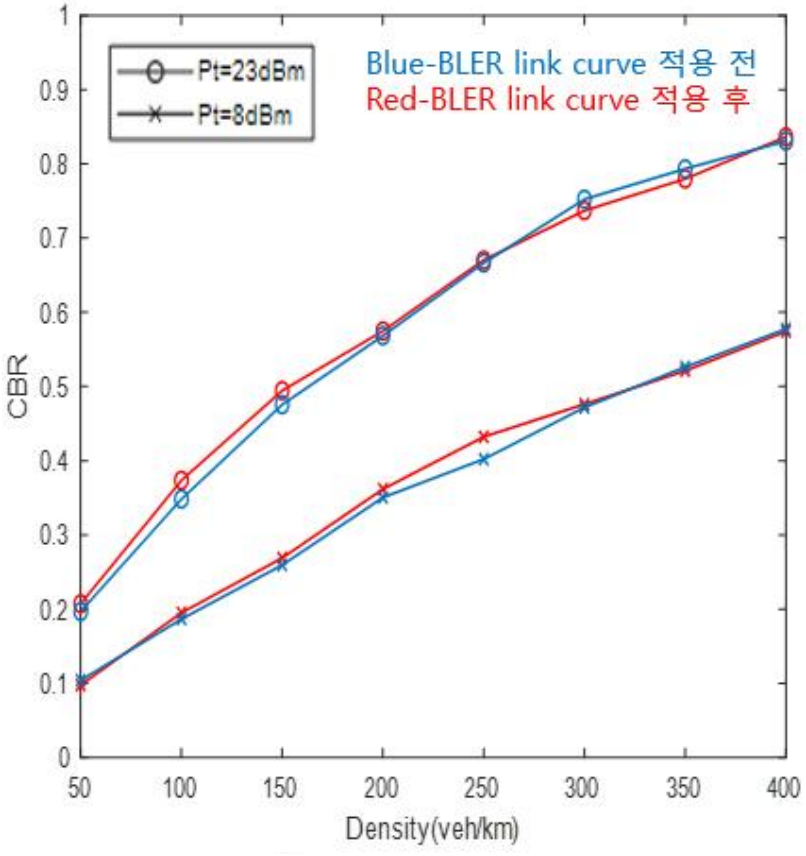
○ 이때 파라미터는 위의 BLER curve 스펙을 고려하여 작성됨.

Variables	Settings
Beacon frequency (fb)	1, 5, 10
Beacon size	300 B
MCS level	7
Channel bandwidth	10 MHz
Transmission power (Pt)	8, 13, 18, 23 dBm
Antenna gain (both txand rx)	3 dB
Noise figure	9 dB
Propagation model	WINNER+, Scenario B1
Probability to maintain the allocation (pk)	0
Sensing threshold to assume the channel busy	-94 dBm
Road length	1km
Density [veh/km]	10, 55, 100

(라)-③ 무선채널 & PHY 시뮬레이터와 통합 시뮬레이터의 비교 분석

○ 두 시뮬레이터를 이용하여 4가지 변수(전송전력, 비콘 메시지 주기, 차량 밀도, CBR)에 따른 결과를 분석

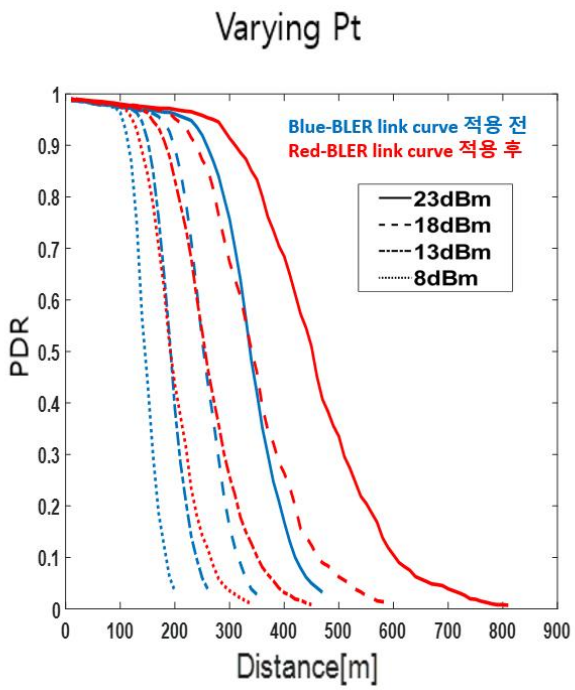
(라)-③-1. Channel Busy ratio (CBR)

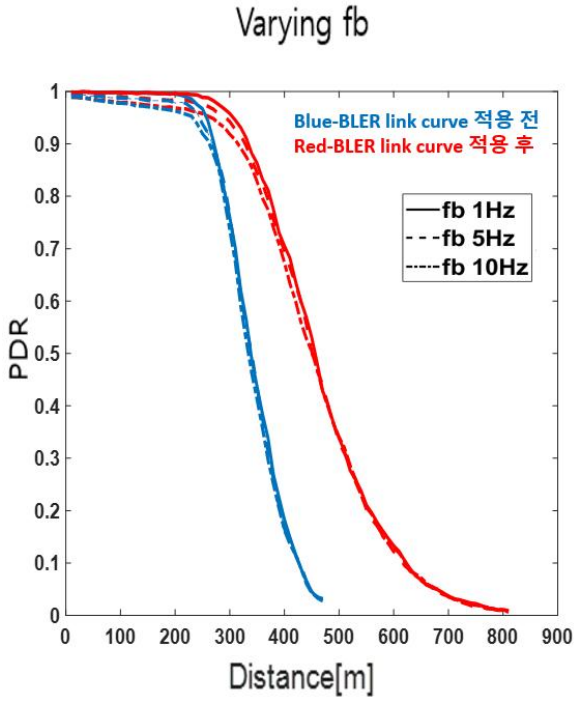


[Density vs CBR]

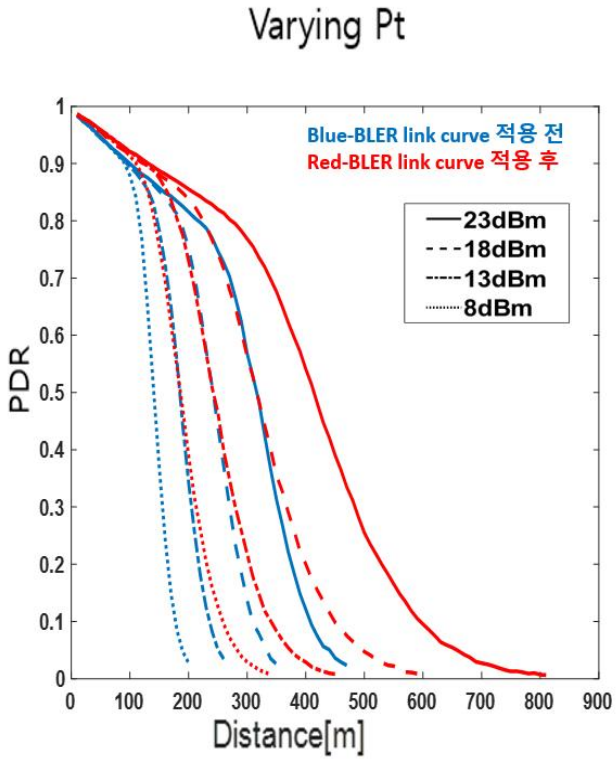
- ✓ CBR은 채널 사용률의 지표이기 때문에 값이 높을수록 동일 채널의 간섭은 크다고 해석 가능, 때문에 CBR이 높은수록 PDR은 감소
- ✓ 동일 파라미터에서 CBR은 두 시뮬레이터의 차이가 거의 없는 것을 확인
- ✓ 이는 두 시뮬레이터 PDR성능에 CBR의 영향은 없다고 해석 가능

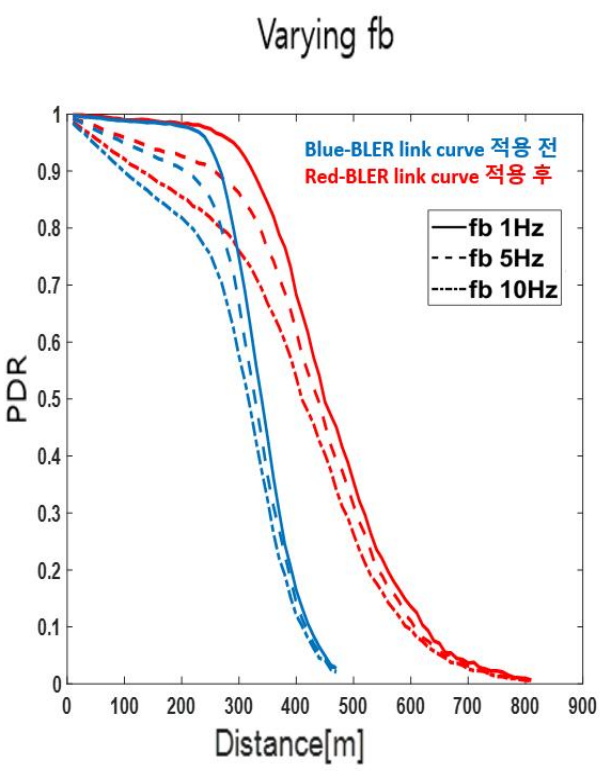
(라)-③-2. 차량 밀도 변화에 따른 Distance vs PDR



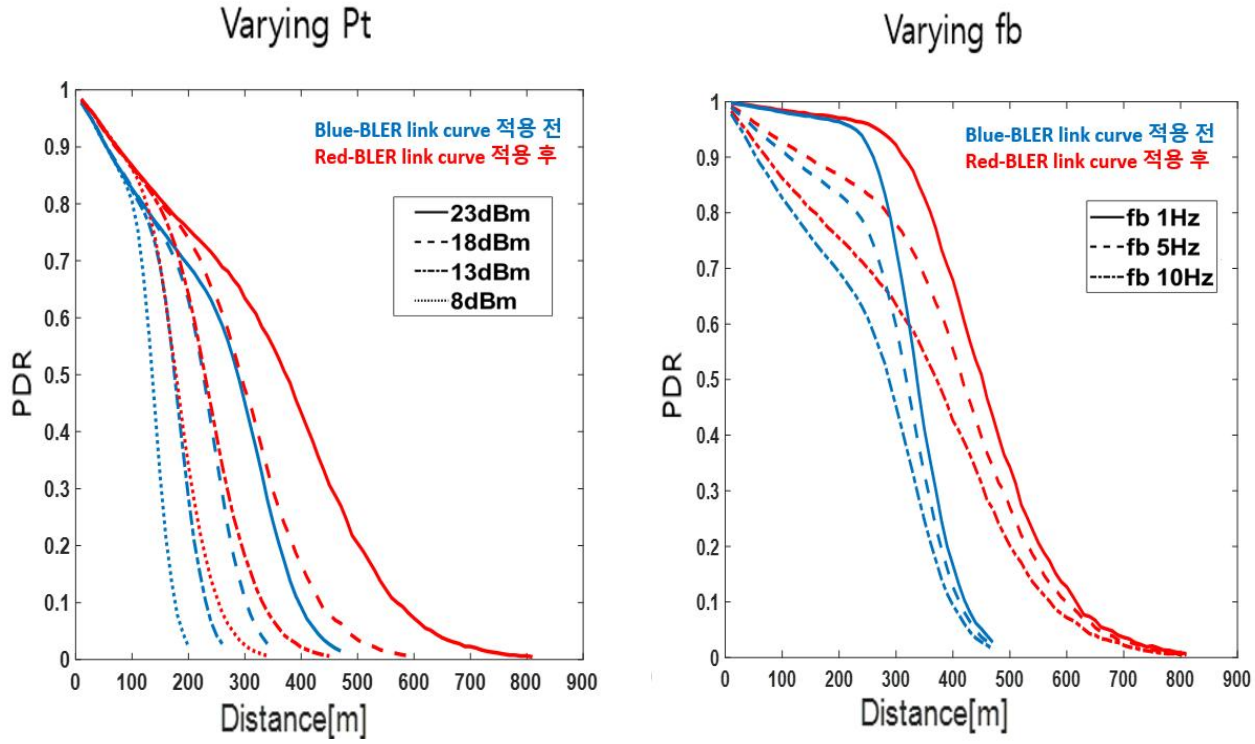


[Distancs vs PDR]
Density = 10 (veh/km)





[Distancs vs PDR]
Density = 55 (veh/km)



[Distancs vs PDR]
Density = 100 (veh/km)

- 비콘 메시지 주기
  - ✓ 비콘 메시지 주기의 조절은 PDR성능을 향상시킬 수 있음(값이 낮을수록 PDR성능 우수).
  - ✓ 비콘 메시지 주기값이 낮아지면 메시지 주기가 길어지므로, 메시지 전송에 이용가능한 서브 채널 수가 증가하기 때문에 간섭의 영향일 줄일 수 있음.
  - ✓ 하지만 안전 메시지라는 특성을 고려할 때 메시지 주기는 높은 값을 유지하는 것이 올바름.
  - ✓ Density = 10(veh/km)의 결과를 보면 차량 밀도가 적을 때는 메시지 주기 조절의 영향이 거의 없는 것을 확인 가능.
- 차량 밀도
  - ✓ 차량 밀도 측면에서 차량 밀도가 적을수록 메시지 전송의 간섭이 줄기 때문에 PDR은 높은 값을 나타냄.
  - ✓ 밀도가 적을 경우에는 간섭의 영향을 고려하지 않고 전송전력을 최대화 하는 것이 유리함.
- 전송전력
  - ✓ 전송전력은 모든 밀도 및 비콘 메시지 주기에 대해 높은 값이 우수한 PDR성능을 보여줌, 이는 유효신호가 간섭의 영향보다 크다고 해석 가능
  - ✓ 만약, 간섭의 영향이 더 큰 시나리오(고 밀도)에서는 전송전력 값을 낮게 운용하는 것이 유리함.
- BLER curve
  - ✓ BLER curve의 도입, 즉 MAC layer와의 결합은 모은 파라미터에서 우수한 PDR성능을 보임.
  - ✓ 이는 기존 PHY layer의 SINR threshold 뿐만아니라 BLER의 확률적인 부분도 고려하기 때문이라고 해석할 수 있음.

(라)-③-3. 통합 시뮬레이터의 성능 검증

○ 3GPP R1-160284[10] 문서에서의 BLER 그래프와 3GPP R-1611594 문서[11]에서의 PDR 성능 그래프를 개발한 PHY/MAC Cross-layer 통합 시뮬레이터를 통해 도출한 성능 그래프와 비교 분석하여 시뮬레이터의 성능 검증을 진행함.

○ 통합 시뮬레이터의 성능은 PHY와 MAC 계층을 포함하므로 각 계층에서의 성능을 비교함으로써 성능 검증이 가능함.

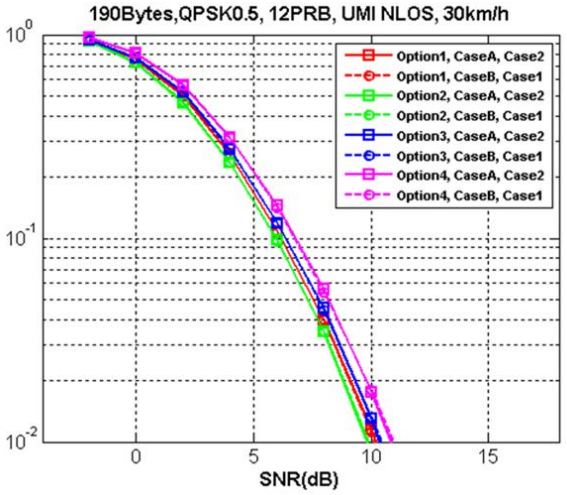
○ 시뮬레이션 환경은 비교 문서와 동일한 환경으로 구성하였음. 문서상에 나와 있는 시뮬레이션 환경과 최대한 동일하게 설정하였으며, 세부적인 설정으로 인하여 결과값이 약간 달라질 수 있음.

○ PHY layer의 성능은 비교 그래프와의 BLER 오차의 RMSE 값을 구하여 비교를 진행하였고 MAC layer의 성능은 PDR 값에 매칭되는 거리를 정확도 기준으로 정함.

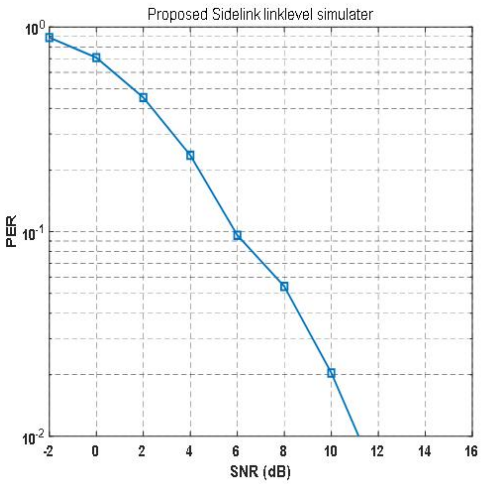
○ 통합 시뮬레이터를 통해 얻은 BLER 그래프의 정확도는 3GPP R1-160284의 BLER 결과 그래프의 최소값과 최대 값을 기준으로 각각 1.62%, 7.8% 오차로 정확도 90%이상을 달성하였음.

○ 통합 시뮬레이터를 통해 얻은 PDR 그래프는 3GPP R1-1611594의 PDR 그래프와 큰 차이가 없으며 91% 이상의 높은 정확도를 보임.

○ 아래의 결과를 종합했을 때, 개발한 PHY/MAC Cross-layer 통합 시뮬레이터의 성능은 질적 성과지표인 90% 이상의 시뮬레이터 정확도를 만족함.



(a) R1-160284 문서의 BLER

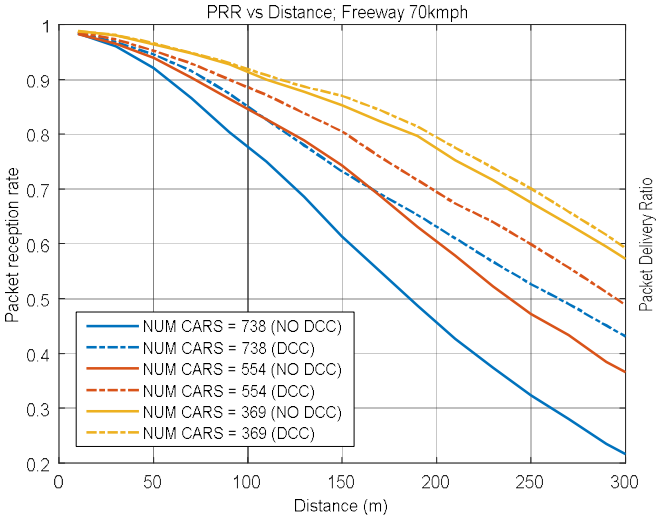


(b) 제안 모델의 BLER 성능

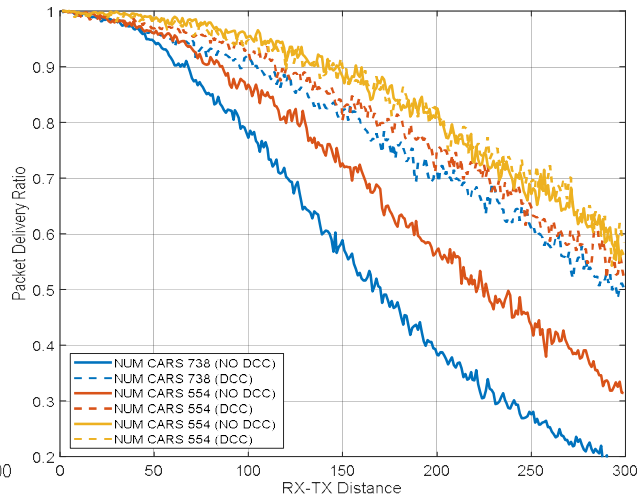
기준 SNR (dB)	3GPP R1-1610284 PER (%)		제안한 C-V2X PHY 시뮬레이터 PER (%)	오차 (%)	
	최소값	최대값		최소값	최대값
-2	91	97	88.8	2.2	8.2
0	73	81	70.8	2.2	10.2
2	47	58	45.2	1.8	12.8
4	23.5	31.5	23.6	-0.1	7.9
6	9.7	15.5	9.6	0.1	5.9
8	3.6	5.5	5.4	-1.8	0.1
10	0.9	1.8	2.4	-1.5	-0.6

최소값 오차의 RMS = 1.62 %, 최대값 오차의 RMS = 7.8%

[PHY layer에 대한 정확도 비교 결과]



(a) R1-1611594 문서의 PDR



(b) 제안 모델의 PDR 성능

PDR	밀도	R1-1611594 Distance	개발한 시뮬레이터 Distance	정확도 (%)
0.7	738	125	120	96
	554	165	160	97
	369	240	240	100
0.5	738	180	165	91
	554	240	230	95
	369	x	x	x
0.2	738	300	280	93
	554	x	x	x
	369	x	x	x

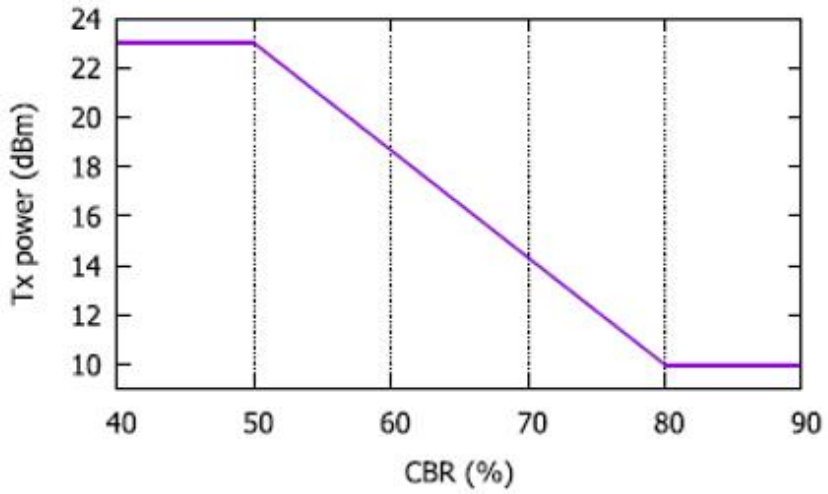
[MAC layer에 대한 정확도 비교 결과]

(마) C-V2X Mode 4 V2V통신의 전송 전력제어 기술 개발

(마)-① SAE J2945/1의 전송전력제어 알고리즘[12]

○ 미국 자동차 공학회(Society of Automotive Engineers)의 J2945/에서 제안하는 전송전력제어 알고리즘은 다음과 같음.

$$P_{tx}\ (dBm) = \begin{cases} 23 & (CBR \le 50\%) \\ 23 - \frac{13}{30}(CBR - 50\%) & (50\% < CBR < 80\%) \\ 10 & (80\% \le CBR) \end{cases}$$



[SAE J2945/1의 전송전력제어 알고리즘]

○ SAE J2945/1에서 전송전력은 10~23dBm으로 제어 가능

○ 해당 알고리즘은 CBR값을 측정하여 이에 따라 전송전력을 선형적으로 조절

○ 각 차량은 메시지 전송주기에 맞추어 전력을 선택

○ 이러한 SAE J2945/1의 전송전력제어 알고리즘은 DSRC를 기반으로 나온 표준이지만, 현재 C-V2X표준에 적용되는 것이 크게 고려되고 있음.

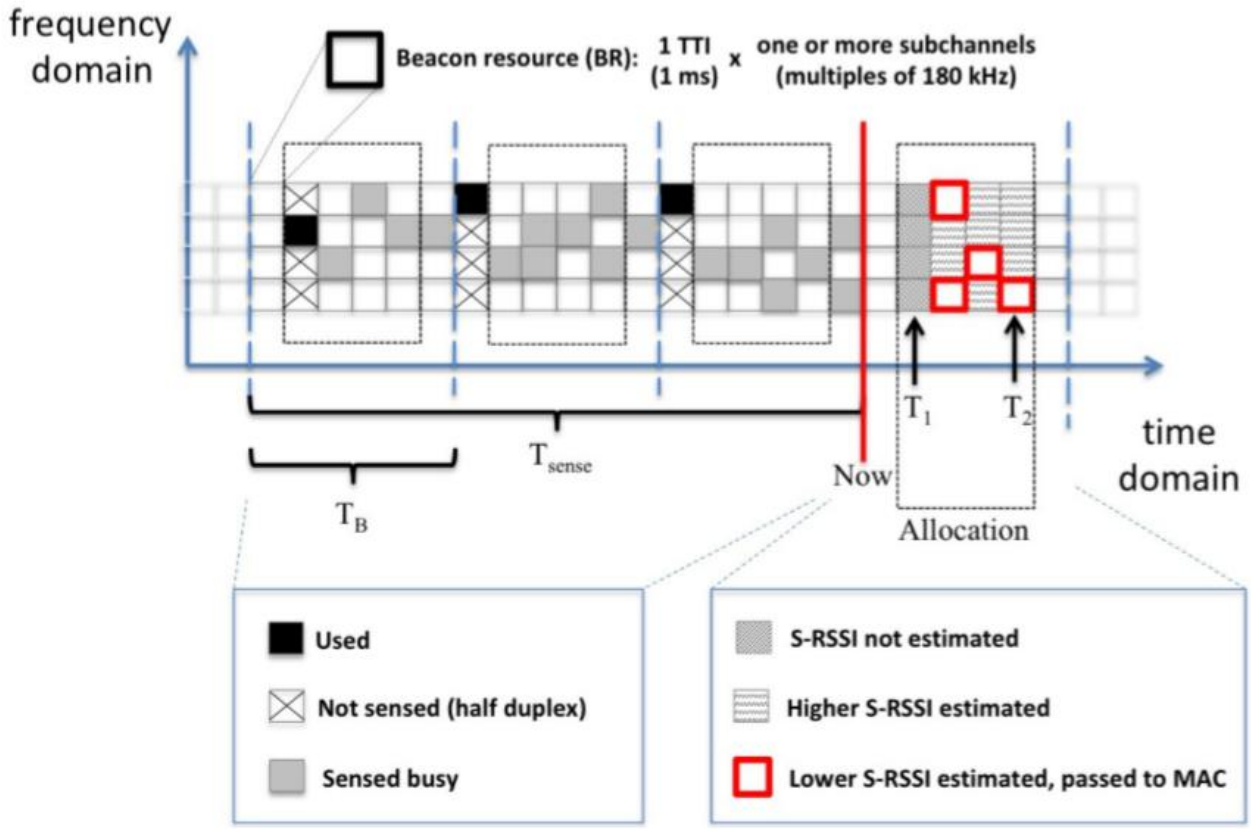
○ 전송전력제어 알고리즘은 차량 밀도가 낮은 시나리오 보다, 높은 시나리오에서 더 효과적임(간섭의 영향이 큰 경우에서 적용 가능)

(마)-② Sensing-Based Power Adaptation for Cellular V2x Mode 4[13] (서울대)

○ 서울대에서 제안하는 알고리즘은 개별 차량이 서브 채널의 값을 센싱하여 전송전력을 조정함.

○ 해당 알고리즘은 서브 채널 재선택 시에 전력을 조정하며, 이는 Sensing Based SPS알고리즘에 기반을 두고 있음.

○ 다음은 SB-SPS알고리즘에 대한 설명임.



[Sensing Based SPS 알고리즘]

① Reselection counter값이 0이되는 차량들에게 적용

② 해당 차량에 대해서 재할당 조건(20%)이 만족되는 차량에게만 서브 채널 재할당 시작

③ 1초(1000ms)의 sensing window(T_{sense})동안 이전 센싱 값 저장

④ 감지가 어렵거나, 임계값보다 높은 슬롯 혹은 서브 채널을 후보에서 제외

⑤ 남게된 서브 채널의 수가 전체 서브 채널의 20%를 만족하지 못할시, 임계값을 3dB증가시켜 서브 채널 수를 20%까지 채움.

⑥ 이때 최종적으로 남은 20%의 서브 채널을 오름차순으로 정렬

⑦ 각 차량은 오름차순으로 정렬된 서브 채널을 랜덤하게 1개 선택

⑧ 위의 과정을 모든 차량이 반복

○ 서울대의 센싱 기반 전력제어 알고리즘은 위 그림의 T_{sense}기간 동안 센싱된 RSSI값을 이용함.

○ 다음은 센싱 기반 전력제어알고리즘의 수도코드를 보여줌.

Algorithm 1 Transmit power adaptation

1: **procedure** POWERALLOCATION
2: Extract sensing matrix of vehicles performing reselection
3: *scheID* ← IDs of vehicles
4: *Nsche* ← the number of *scheID*
5: *sensMatSche* ← S-RSSI matrix for *scheID*
6: *TH* ← threshold value
7: $i \leftarrow 1$
8: **while** $i < Nsche + 1$ **do**
9: Sum S-RSSI values in the same subframe with reselected resource
10: *NR* ← new resource of *scheID(i)*
11: *NRF* ← S-RSSI value in the same subframe with *NR*
12: $Interf \leftarrow \sum_{NRF} senMatSche$
13: Adaptive power control with S-RSSI values
14: $P(i) \leftarrow (1 - \min(Interf/TH, 1)) \times 13 + 10$ dBm
15: $i \leftarrow i + 1$
return *P*.

[C-V2X Mode 4 V2V 센싱기반 전송전력제어 알고리즘 수도코드]

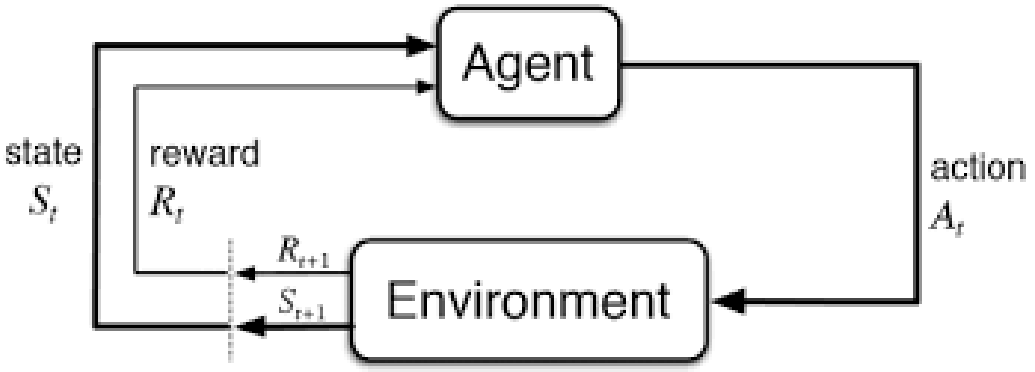
○ 위의 수도코드를 보면, 해당 알고리즘은 새롭게 선택되는 서브 채널의 RSSI값을 간섭으로 측정하여 해당 값과 TH(threshold)를 비교하여 전력을 조정함.

○ 여기서 TH(threshold)는 RSSI값이 가장 좋지 않은(가장 높은) 값으로 설정 가능하며 이는 시뮬레이션 환경에 맞게 조절 가능함.

(마)-③ 심층 강화학습을 이용한 C-V2X Mode4 V2V통신의 전송전력제어

○ 강화학습이란 학습의 주체인 agent가 주어진 환경과 상호작용을 하며 목표로 설정한 reward를 최대화하는 방향으로 학습하는 인공지능 기술을 말함.

○ 다음은 강화학습의 환경과 agent의 상호작용을 보여주는 그림임.



[강화학습 구조]

○ 본 연구에서 제안하는 전력제어 알고리즘은 심층 강화학습을 이용함.

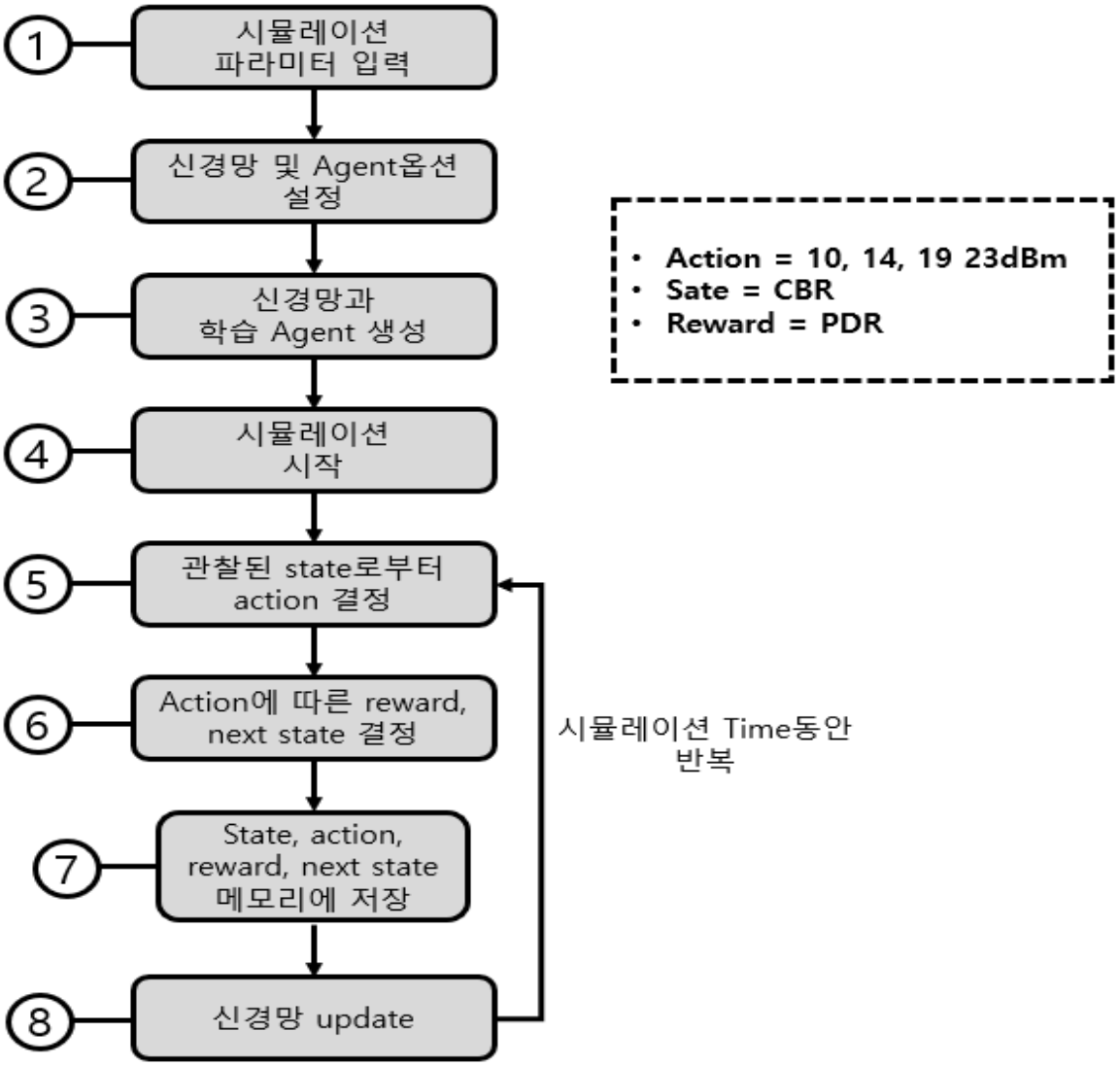
○ 심층 강화학습 중 Deep Q-Network(DQN)를 이용하여 학습

○ 이러한 심층 강화학습의 장점은 다음과 같음.

- 기존 강화학습은 tabluar 방식으로 상호작용하는 환경이 커지거나 복잡하다면 학습의 어려움이 있지만, 심층 강화학습은 신경망을 통해 학습하고 값을 산출하기 때문에 어렵고 복잡한 환경에서도 잘 학습함.
- Replay memory를 두어 이전에 쌓아둔 데이터를 불러들여 데이터의 낭비가 적음.

○ 심층 강화학습을 이용한 전력제어의 학습목표는 파라미터에서 정의한 awreness range의 PDR성능을 최대화 하는것이며 이를 위해 다수의 에피소드를 반복 학습함.

○ 다음은 심층 강화학습 시뮬레이터의 학습 알고리즘은 나타냄.

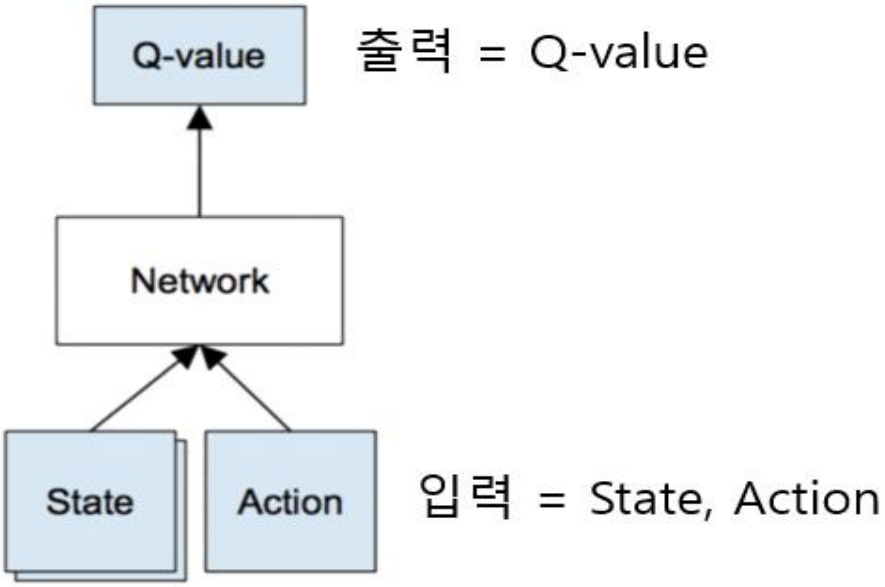


[시뮬레이션 심층 강화학습 알고리즘]

① 시뮬레이션을 동작시키기 위해 시뮬레이션 입력 파라미터 설정 ex) 차량 밀도, 도로 길이, 시뮬레이션 time, 속도 등

② 학습에 이용할 신경망을 설계하고, 학습 agent의 옵션을 설정 ex) 학습률α, memory size, 시뮬레이션 반복 수 등

③ 신경망과 설정된 옵션이 적용된 agent를 생성함, 이때 신경망의 입출력 구조는 다음과 같음.



[신경망 입/출력 구조]

④ 학습을 위해 시뮬레이션이 시작함.

⑤ 비콘 메시지 주기(0.1s)에 따라 측정된 CBR값에 따라 action을 선택함.

⑥ 선택한 action에 대한 reward가 산출되고, 해당 action을 취해 바뀌는 CBR을 next state로 설정

⑦ 신경망을 학습시키기 위해 state, action, reward, next state를 memory에 저장함.

⑧ memory에 저장된 값을 불러와 신경망을 update 함.

⑨ 위의 모든 과정을 시뮬레이션이 종료까지 반복

(마)-④ C-V2X 전력제어 알고리즘 성능 결과 비교

○ 동등한 성능 비교 분석을 위해 시뮬레이션 파라미터는 다음과 같이 설정함.

○ 해당 파라미터의 awreness range는 3GPP의 TR 36.885, TR22.885[14]의 내용을 참고하여 300m로 설정

○ 각 알고리즘의 결과 비교는 Distance vs PDR, Delay time vs CCDF의 두가지 결과에 대해서 비교 분석함.

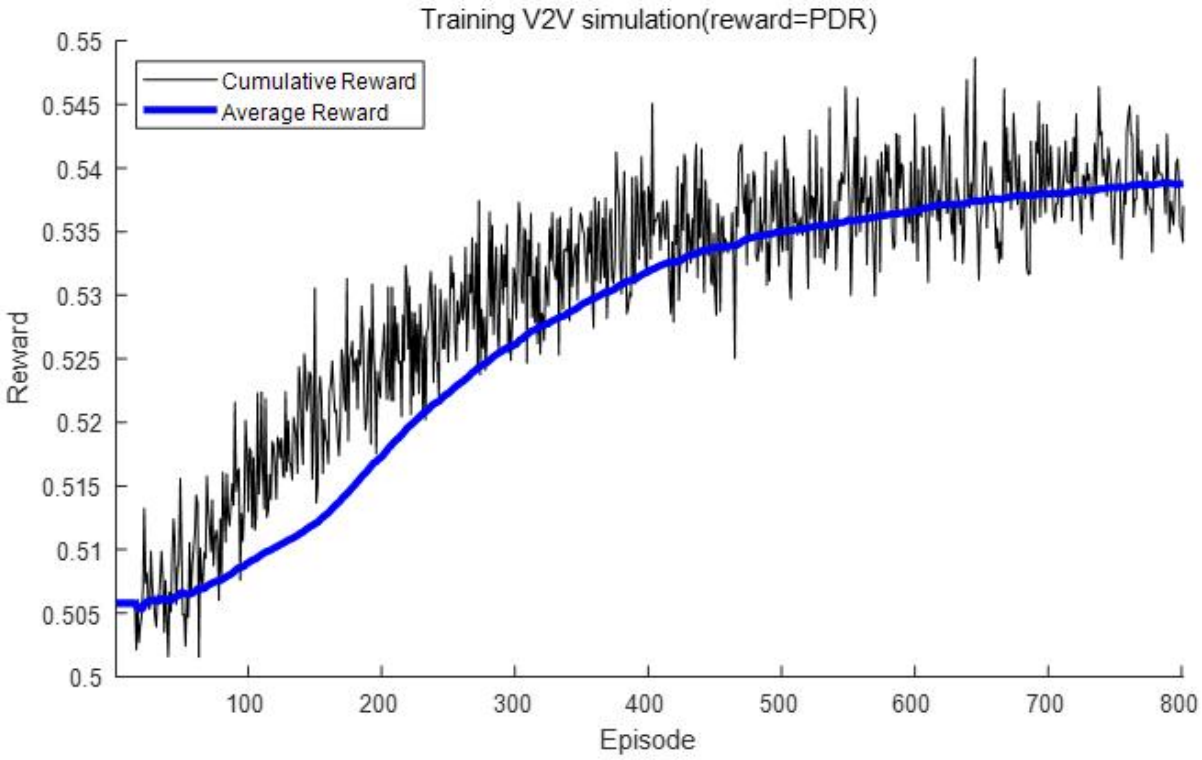
○ 다음은 결과 분석에 이용된 시뮬레이션 파라미터임.

Variables	Settings
Beacon frequency (fb)	10
Beacon size	300 B
MCS level	3
Channel bandwidth	10 MHz
Transmission power (Pt)	10 ~ 23 dBm
Antenna gain (both txand rx)	3 dB
Noise figure	9 dB
Propagation model	WINNER+, Scenario B1
Probability to maintain the allocation (pk)	0.8
Sensing threshold to assume the channel busy	-94 dBm
Road length	1km
Density [veh/km]	300
awreness range	300 m
Nlane	1

[시뮬레이션 파라미터]

(마)-④-1. J2945/1 vs 심층 강화학습을 이용한 C-V2X Mode4 V2V통신의 전송전력제어

○ 심층 강화학습을 이용한 전송전력제어 학습 과정은 다음과 같으며, 약 800개의 에피소드가 학습될 때 수렴함.

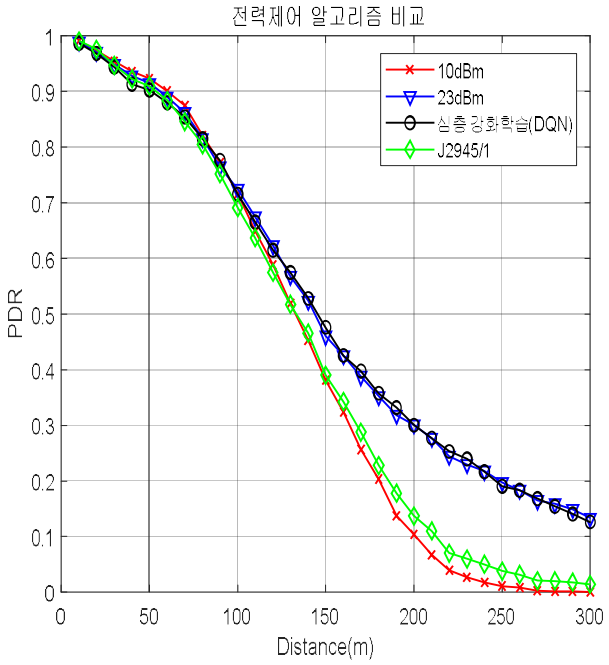


[심층 강화학습의 학습 과정]

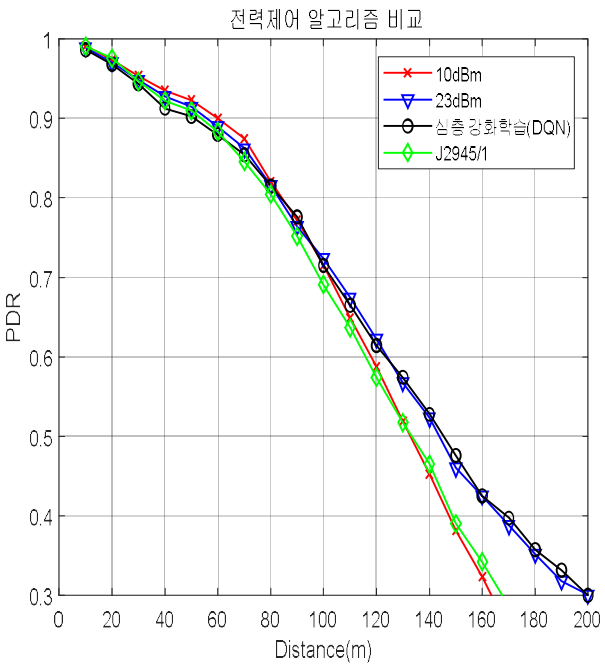
✓ 학습과정을 보면 초기 0.505에 가깝던 Reward(PDR)값이 0.545 에 가깝게 학습된 것을 확인 가능

✓ 이는 약 4%의 PDR성능 향상을 나타냄.

○ Distancs vs PDR 결과 분석



[결과 비교 Distance vs PDR]



[확대 본]

✓ J2945/1의 전력제어 알고리즘은 시뮬레이션 시간 동안 평균적으로 약 12dBm으로 운용함.

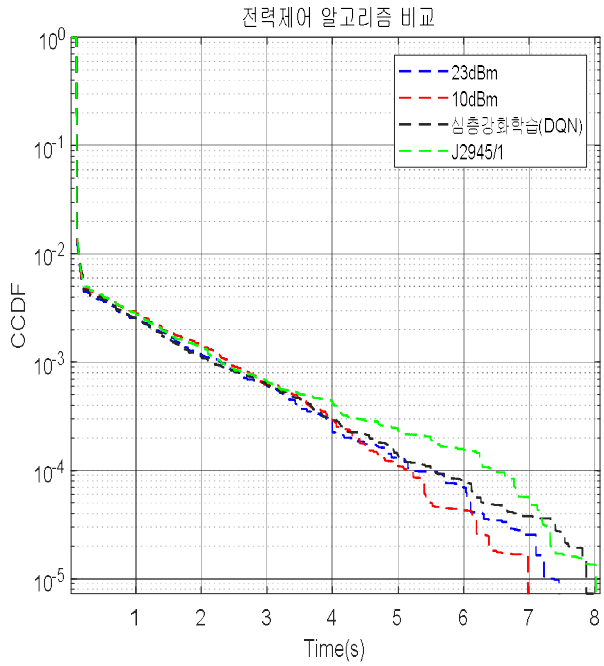
✓ 반면 심층 강화학습의 알고리즘은 시뮬레이션 시간 동안 약 22.7dBm으로 전송전력을 운용함.

✓ 이러한 전송전력의 차이는 심층 강화학습은 23dBm의 고정전력과 비슷한 거리별 PDR양상을 띄게 하였고, J2945/1의 전력제어 알고리즘은 고정전력 10dBm의 결과와 비슷한 거리별 PDR 양상을 띄게 하였음.

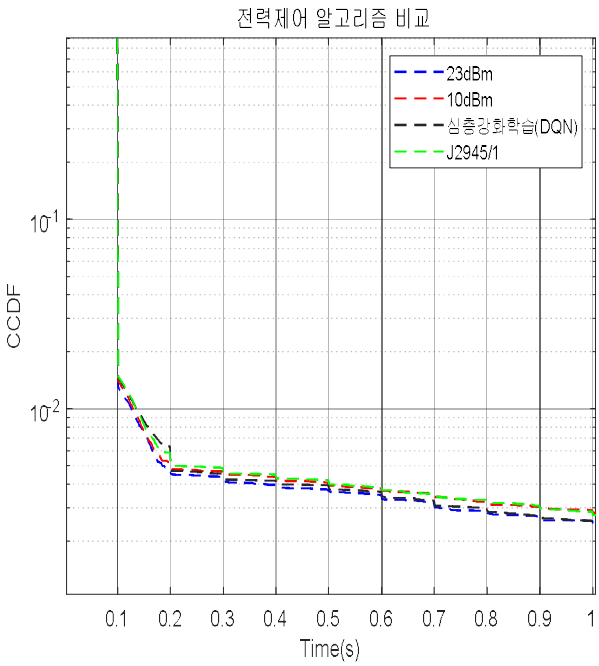
✓ 결과적으로 동일 파라미터에서 전체적인 거리별 PDR성능은 심층 강화학습의 알고리즘이 더 우수한 것을 확인함.

✓ 해당 결과를 통해 J2945/1의 전력제어 알고리즘은 C-V2X에 효과적이지 못하다고 해석 가능.

○ Delay time vs CCDF



[결과 비교 Time vs CCDF]



[확대 본]

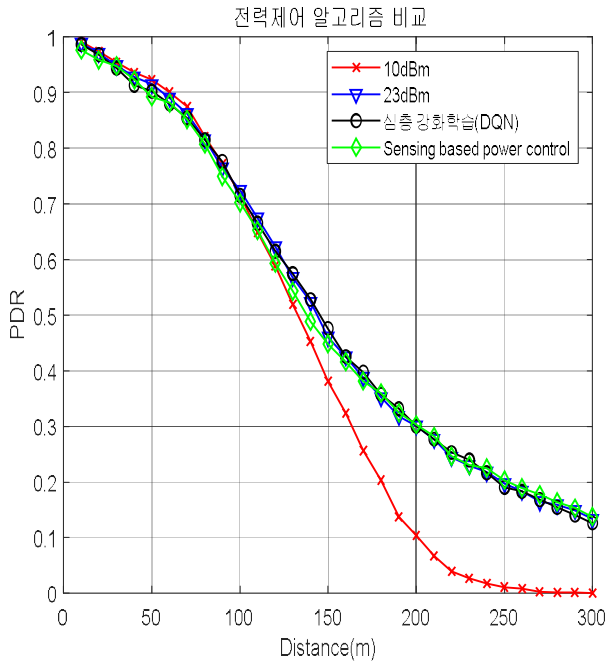
✓ 메시지 Delay란 수신 차량이 동일 송신 차량으로부터 받는 메시지 사이의 Gap을 의미함.

✓ 메시지 Delay의 CCDF를 보면 고정전력과 2개의 알고리즘 성능 차이가 모두 크지 않음을 확인.

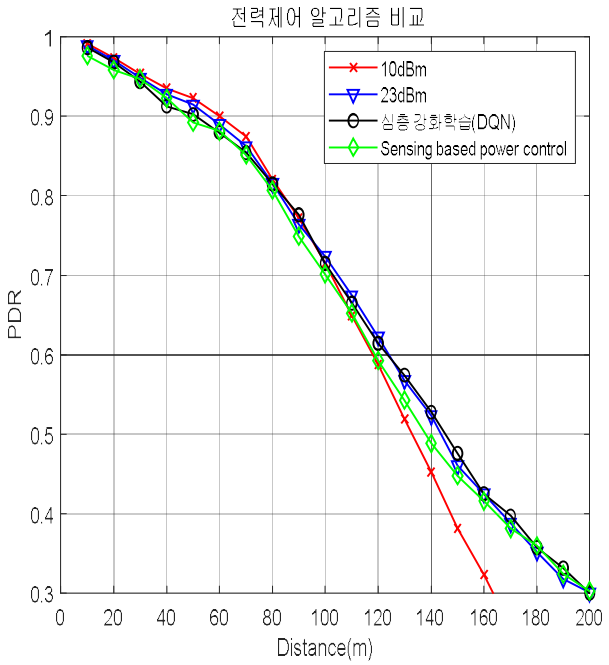
✓ 이는 두 개의 알고리즘에 메시지 Delay가 비슷하며, 이러한 경우 심층 강화학습의 전력제어 알고리즘이 우수하다고 최종 결론 낼 수 있음.

(마)-④-2. Sensing-Based Power Adaptation for Cellular V2x Mode 4 vs 심층 강화학습을 이용한 C-V2X Mode4 V2V통신의 전송전력제어

○ Distance vs PDR



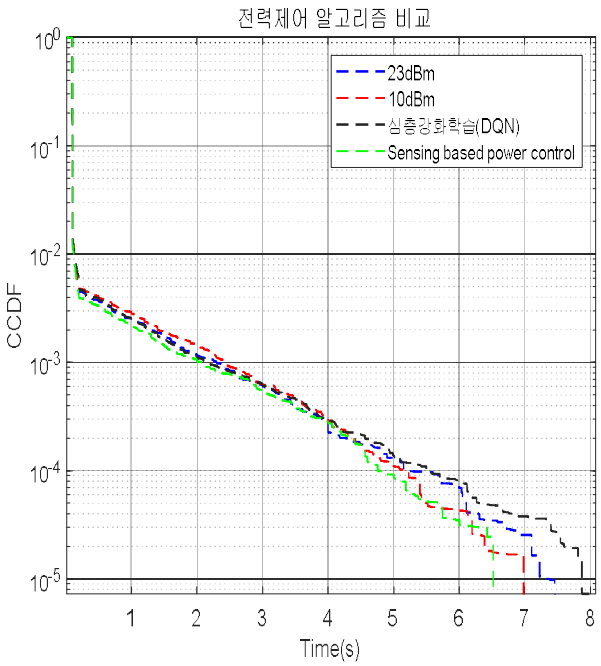
[결과 비교 Distance vs PDR]



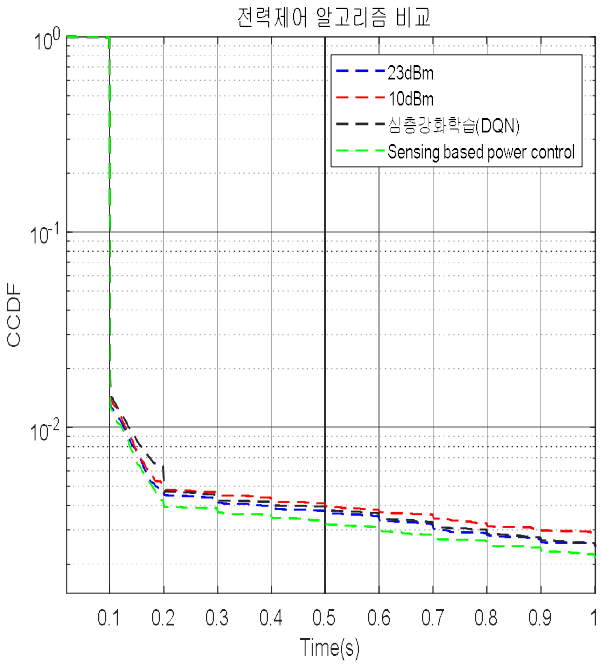
[확대 본]

- ✓ 결과를 보면 서울대의 센싱기반 전력제어 알고리즘과 심층 강화학습을 이용한 전력제어 알고리즘 모두 고정전력 23dBm의 거리별 PDR양상을 나타냄.
- ✓ 결과의 〈확대 본〉을 보면 부분적으로 심층 강화학습의 알고리즘이 높은 성능을 보임.
- ✓ awreness range의 PDR성능 측면에서 서울대의 알고리즘보다 심층 강화학습을 이용한 알고리즘이 약간 더 우수한 성능을 내는 것을 확인.

○ Delay time vs CCDF



[결과 비교 Time vs CCDF]



[확대 본]

✓ 메시지 Delay의 CCDF를 보면 고정전력과 2개의 알고리즘 성능 차이가 모두 크지 않음을 확인함.

✓ 이는 두 개의 알고리즘에 메시지 Delay가 비슷하며, 심층 강화학습의 전력제어 알고리즘이 우수한 결과를 나타냄을 알 수 있음.

(3) 자율협력주행 통합 시뮬레이션 플랫폼 개발

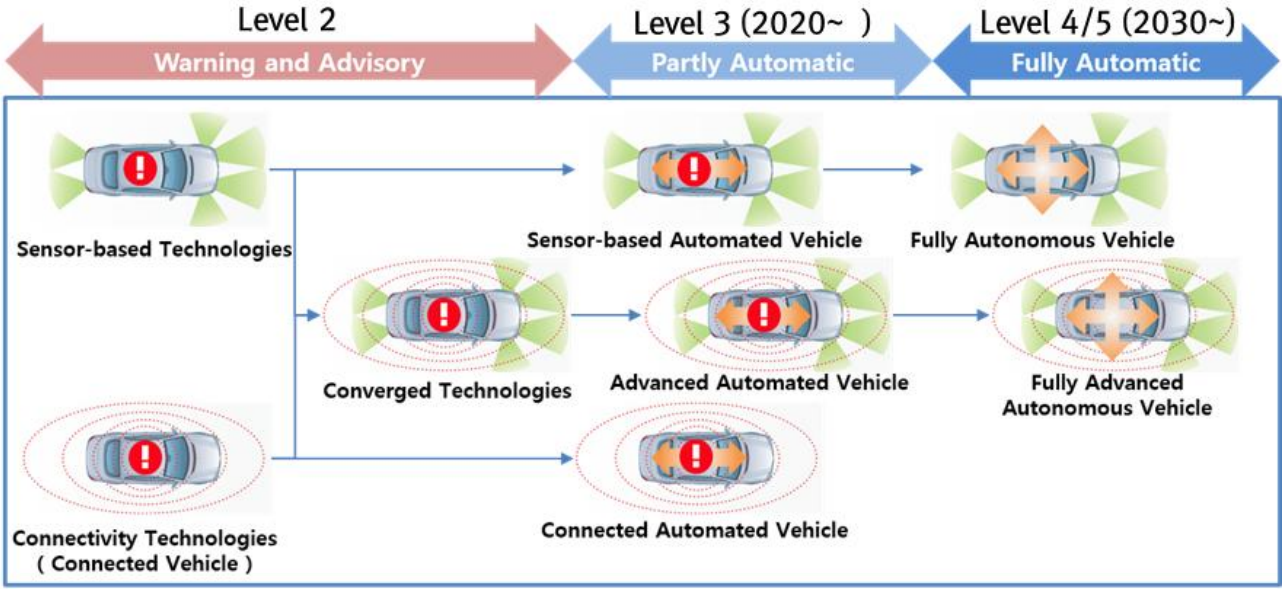
(가) 협력자율주행 서비스별 평가 시나리오 및 도심 교통환경 모델 분석

(가)-① 협력자율주행 서비스별 시나리오 분석

(가)-①-1. 협력자율주행 개념

○ V2X 통신과 CAV(Connected Autonomous Vehicle)

- 자율주행이 운전자를 보조하는 자율주행 3단계를 넘어서. 운전자를 완전히 대신하는 자율주행 4단계와 5단계에서는, 자동차에 탑재된 자체 센서와 자율주행 기술만으로는 안전한 운행을 보장할 수 없음다는 의견이 모아지고 있음.
- 이는 자율주행 자동차의 카메라, 라이다와 같은 주요 센서의 센싱 범위가 가시영역으로 제한되기 때문임.
- 따라서, 보이지 않는 지역의 상황을 인지하기 위해서는 자율주행 자동차 간에 V2X 통신을 통해 각자가 센싱한 상황 정보를 공유해야 할 필요성이 제기되는데, 이를 협력 센싱 (Cooperative Sensing)라고 함.
- 또한, V2X 통신을 이용하여 자율주행 자동차간의 운전 의도를 서로 교환하는 협력 머뉴버링(Cooperative Maneuvering) 기술이 필요하게 됨. 따라서, 자율주행에서도 V2X 통신의 중요성이 더욱 부각되고 있는데, V2X 통신에 의한 연결성을 부여한 자율주행자동차를 CAV(Connected Autonomous Vehicle)이라고 함.



[V2X 통신에 기반한 CAV로의 발전[15]]

○ CAV 지원을 위한 V2X 통신 기술의 요구 성능

- V2X 통신이 CAV를 지원하기 위해서는 기존 C-ITS보다 훨씬 더 많은 양의 데이터를 더 낮은 지연시간으로 전송해야하기 때문에, C-ITS를 위해 개발된 V2X 기술은 자율주행에 사용될 수 없음.
- 따라서, 3GPP에서는 자율주행 지원을 위해 새로운 주파수 대역에서 동작하는 5세대(5G) NR(New radio) 기반의 V2X 통신 기술을 표준화하고 있으며, 2019년 12월에 발표될 예정임 =.
- 아래 그림[16]은 5GAA(5G Automotive Association)에서 정의한 5G NR C-V2X에 기반한 4개의 자율주행 서비스(Platooning, Sensor sharing, Remote Driving, Advanced Driving)의 개념과 이를 지원하기 위해 요구되는 V2X 통신의 latency, reliability, 그리고 data rate를 보여주고 있음.



NR-V2X requirements for autonomous driving (SA1 TS22.186)

Use Cases	E2E latency (ms)	Reliability (%)	Data rate (Mbps)
Vehicle Platooning	10	99.99	65
Advanced Driving	3	99.999	53
Extended Sensors	3	99.999	1000
Remote Driving	5	99.999	UL:25, DL:1

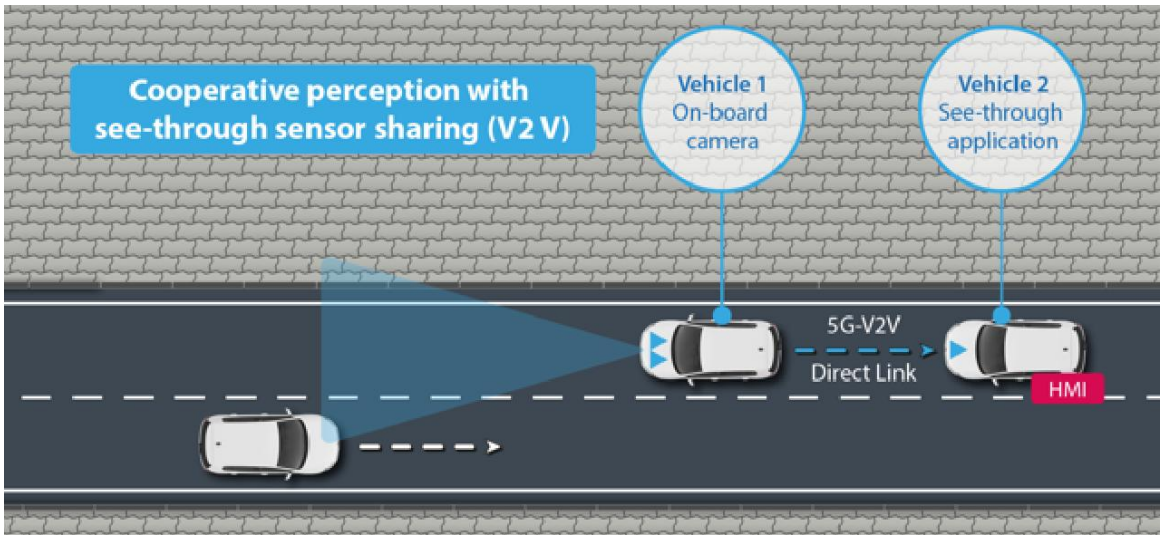
	Lateral (m)	Longitudinal (m)
Positioning Accuracy	0.1	0.5

Note: 5GAA may adjust the above requirements according to inputs from car OEMs.

- Sensor sharing과 Advanced Driving은 각각 본 연구에서 개발하고 있는 협력센싱 및 협력머뉴버링과 동일한 개념임. 이를 지원하기 위해서 V2X는 수 ms의 통신지연과 99.99% 정도의 신뢰도가 필요함을 파악할 수 있음. 따라서, C-ITS를 위해 개발된 IEEE802.11p/WAVE나 3GPP C-V2X 기술은 자율주행 서비스를 지원하기에는 성능이 상당히 부족함.

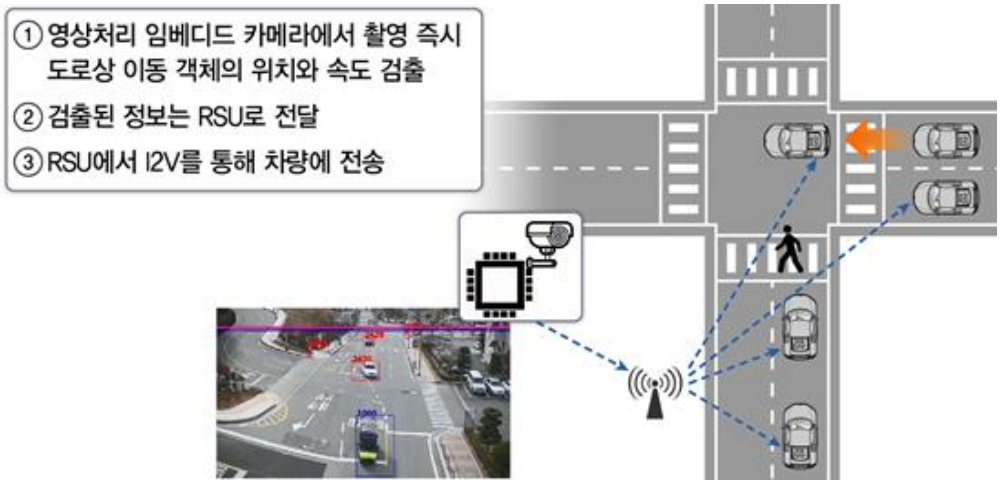
(가)-①-2. **협력센싱 서비스**

○ 자율주행 차량간 협력센싱 : 자율주행 차량이 센서를 통해 센싱한 raw data나 처리된 인지정보를 주변 차량과 공유하는 서비스이며, 이를 통해 자율주행 자동차의 인지 범위를 확장할 수 있음. 아래 그림은 Vehicle 2가 Vehicle 1의 카메라를 통해 센싱된 정보를 V2V 통신을 이용하여 공유하는 예를 보여줌.



[자율주행 차량간 협력센싱서비스의 예[17]]

○ 인프라 센서와 자율주행 차량간 협력센싱 : 도심 교차로나 합류도로에서 자율주행 차량의 자체 센서가 센싱하지 못하는 blind spot이 항상 발생함. 인프라 센서(카메라/lidar/radar 등)가 이러한 blind spot을 센싱하고 처리하여 동적 지도를 생성하고, 동적지도 정보를 R2V 통신을 통해 자율주행 차량과 공유하는 서비스임. 아래 그림은 인프라 카메라에서 blind spot을 센싱하고, 이를 처리하여 동적지도를 생성하고, 이를 차량에 R2V 통신을 통해 전달하는 개념을 보여주고 있음.

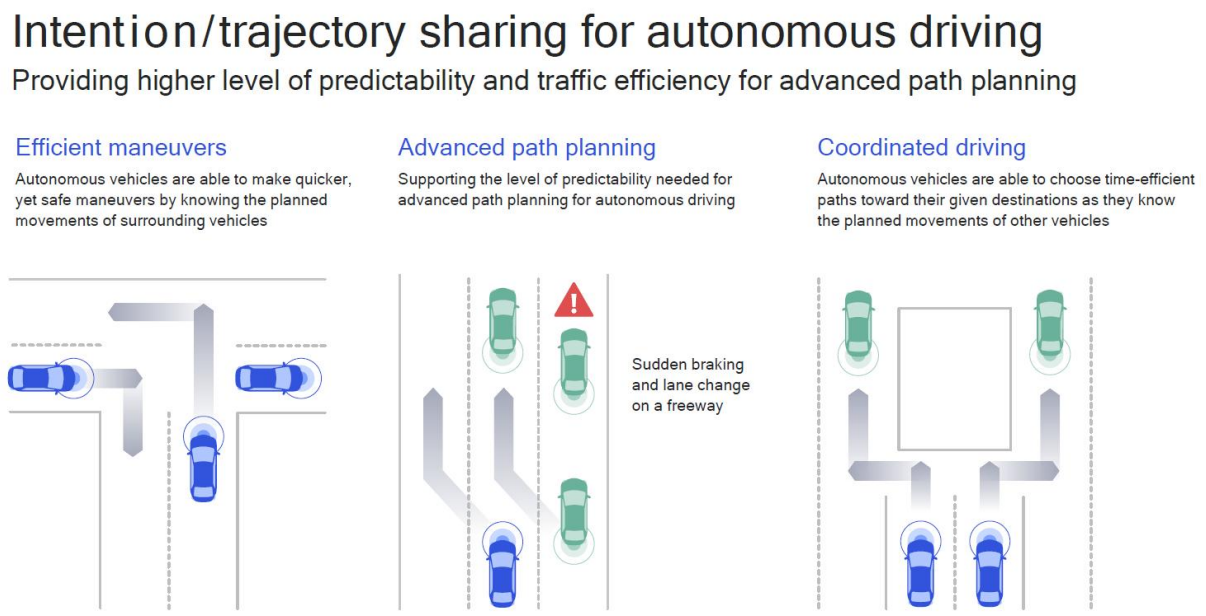


[인프라센서와 차량간의 협력센싱 서비스 개념]

(가)-①-3. 협력머뉴버링 서비스

○ 협력머뉴버링은 자율주행 차량의 운전의도를 주변 차량들에게 V2V 통신을 통해 전달하는 서비스임. 이를 통해, 차선변경, 교차로 통과, 끼어들기 등의 운전의도를 주변 차량에게 전달하고, 주변 차량들이 이에 대해 대응할 수 있도록 하는 서비스임.

○ 아래 그림은 Qualcomm에서 제안하고 있는 협력머뉴버링 서비스의 개념을 보여주고 있음. 자율주행 차량이 주변 차량들의 계획된 경로와 그에 따른 운전의도를 공유하게 되면 더 빠르고 안전하게 주행할 수 있음. 또한, 주변 차량의 운전의도를 분석하여 좀 더 빠른 경로를 결정할 수 있음.



[협력머뉴버링 서비스 개념, Qualcomm[18]]

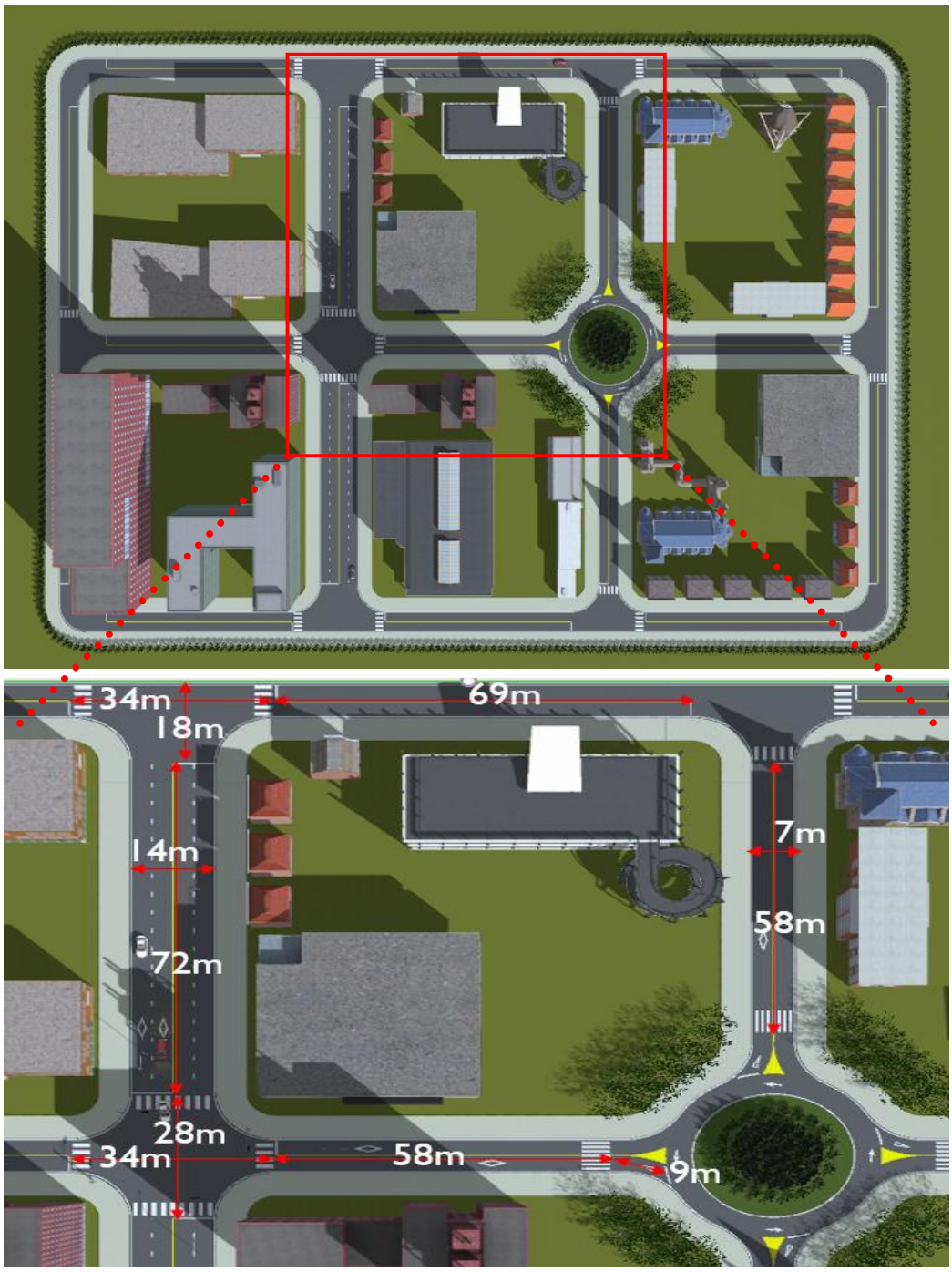
(가)-② 도심 교통환경 모델 분석

○ 협력자율주행 서비스 평가를 위한 신호등 교차로 및 회전 교차로를 포함하는 도심 가상 운행 환경을 구축하기 위한 도심 교통환경을 모델링함.

- 4차선 및 2차선 도로, 횡단보도, 교통표지, 신호등 교차로, 회전교차로 등에 대한 설계 지침을 조사하고 그에 따라 도심 교통환경을 모델링함.

○ 신호 교차로 모델링

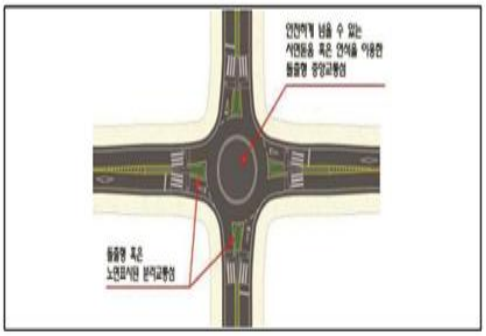
- 4차선과 2차선 도로가 만나는 신호 교차로 모델링.
- 시뮬레이션 환경 내 다른 도로와 동일한 규격 적용



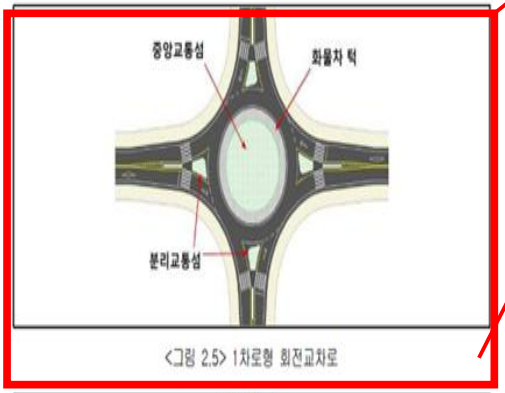
[신호 교차로 및 도로 모델링]

○ 회전교차로 모델링

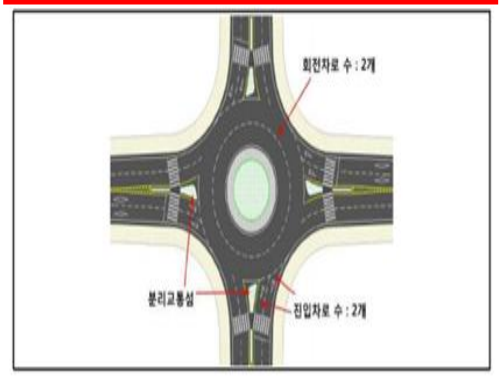
- 회전교차로 설계지침(국토교통부 2014)에 근거하여 모델링
- 설계속도가 70km/h 이하 도로에 적용
- 회전교차로 접근로의 권장 설계속도는 최대 40~50km/h
- 회전부의 권장 설계속도는 20~30km/h
- 본 연구에서는 아래에서 1차로형 회전교차로를 모델링함



<그림 2.4> 소형 회전교차로



<그림 2.5> 1차로형 회전교차로



<그림 2.6> 2차로형 회전교차로

<표 4.8> 소형 회전교차로 회전부 제원(단위 : m)

설계기준 자동차	회전부 설계속도 (km/h)	내접원[주1] 지름	중앙교통섬[주2] 지름	회전차로 폭
소형자동차	10	15.0~18.5	8.0~10.5	4.4~3.6
	15	19.0~22.5	11.0~14.0	4.4~3.6
	20	23.0~26.0	15.0~18.0	4.4~3.8

주1) 내측 길이께는 내접원 지름에 포함됨
주2) 소방자동차 등의 긴급자동차 통행을 위하여 중앙교통섬을 사변돌옴으로 설치

<표 4.9> 1차로형 회전교차로 회전부 제원(단위 : m)

설계기준 자동차	회전부 설계속도 (km/h)	내접원 지름	중앙교통섬 지름	화물차 턱 폭[주]	회전차로 폭
대형자동차	20	27.0~40.5	17.0~31.0	1.5~1.0	5.0~4.5
	30	41.0~50.0	31.0~40.0	1.0	
세미트레일러	20	30.0~35.5	18.0~24.5	3.0~2.0	6.0~5.5
		36.0~46.5	25.0~35.5	2.5~1.5	
	30	47.0~50.5	34.0~40.5	2.0~1.5	5.5~5.0
		51.0~55.0	39.0~43.0	2.0~1.5	

주) 화물차 턱 폭은 중앙교통섬 지름에 포함됨

<표 4.10> 2차로형 회전교차로 회전부 제원(단위 : m)

조합 설계기준 자동차	회전부 설계속도 (km/h)	내접원 지름	중앙교통섬 지름	화물차 턱 폭	회전차로 폭)
소형자동차 + 대형자동차	20	38.0~49.5	20.0~31.5	3.0~2.5	9.5~9.0
	30	50.0~60.0	32.0~41.0	3.0~2.5	
대형자동차 + 세미트레일러	20	45.0~60.5	22.0~38.5	2.5~2.0	11.5~11.0
	30	61.0~65.0	38.0~42.0	2.5~2.0	
세미트레일러 + 세미트레일러	20	45.0~60.5	21.0~37.5	3.0~0.5	12.0~11.5
	30	61.0~65.0	37.0~42.0	0.5	

[회전 교차로 모델링[19]]

○ 회전교차로 규격

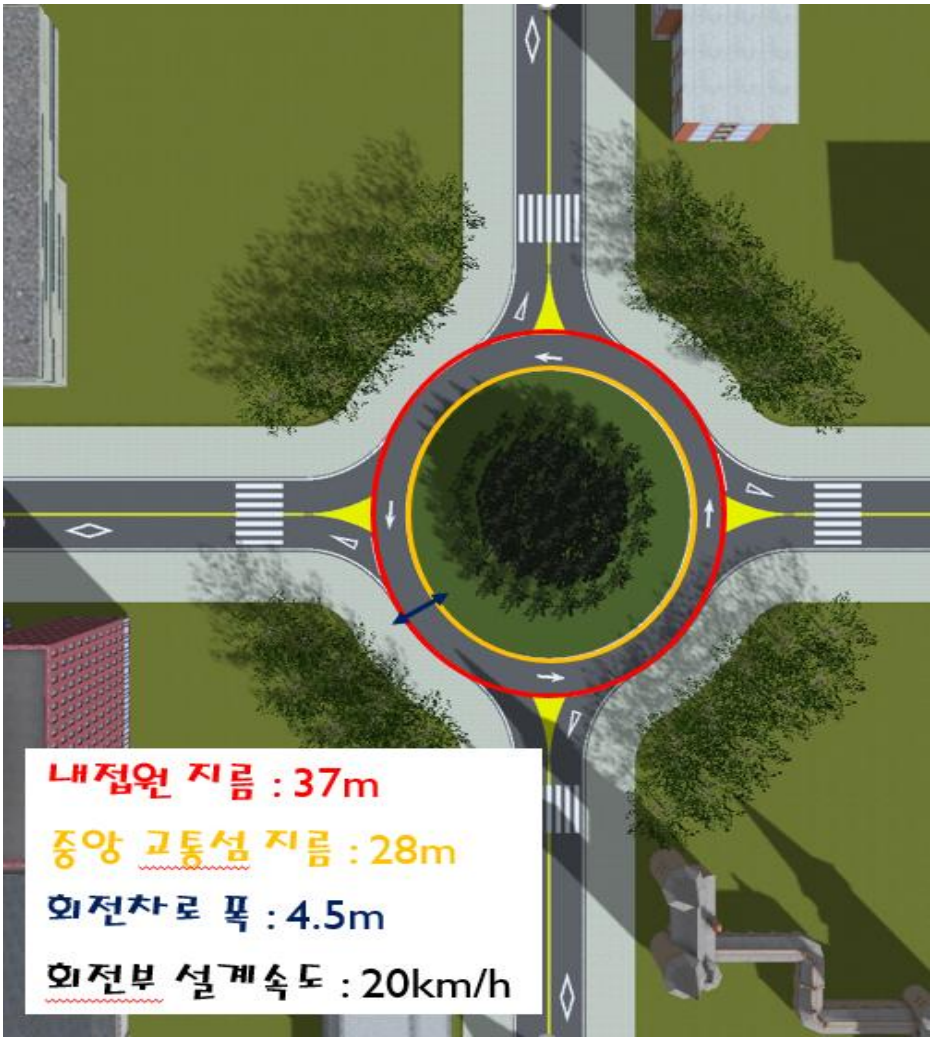
- 빨간색 원은 내접원 지름으로 규격에 따라서 37m로 설계
- 주황색 원은 중앙 교통섬 지름으로 규격에 따라서 28m로 설계
- 남색 선은 회전차로 폭으로 규격에 따라서 4.5m로 설계
- 회전부 설계속도는 규격에 따라서 20km/h로 설계

<표 4.9> 1차로형 회전교차로 회전부 제원(단위 : m)

설계기준 자동차	회전부 설계속도 (km/h)	내접원 지름	중앙교통섬 지름	화물차 턱 폭주)	회전차로 폭
대형자동차	20	27.0~40.5	17.0~31.0	1.5~1.0	5.0~4.5
	30	41.0~50.0	31.0~40.0	1.0	
세미트레일러	20	30.0~35.5	18.0~24.5	3.0~2.0	6.0~5.5
		36.0~46.5	25.0~35.5	2.5~1.5	
	30	47.0~50.5	34.0~40.5	2.0~1.5	5.5~5.0
		51.0~55.0	39.0~43.0	2.0~1.5	

주) 화물차 턱 폭은 중앙교통섬 지름에 포함됨

[1차로형 회전 교차로 규격[19]]



[모델링된 1차로형 회전 교차로]

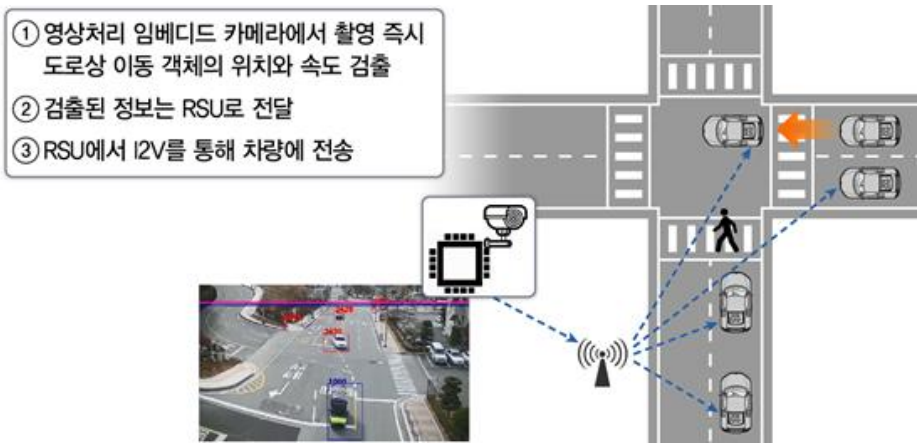
(나) 협력자율주행 시나리오 도출 및 V2V 메시지 포맷 개발

(나)-① 협력자율주행 시나리오 도출

(나)-①-1. 협력센싱 서비스 평가 시나리오

○ 서비스 개요

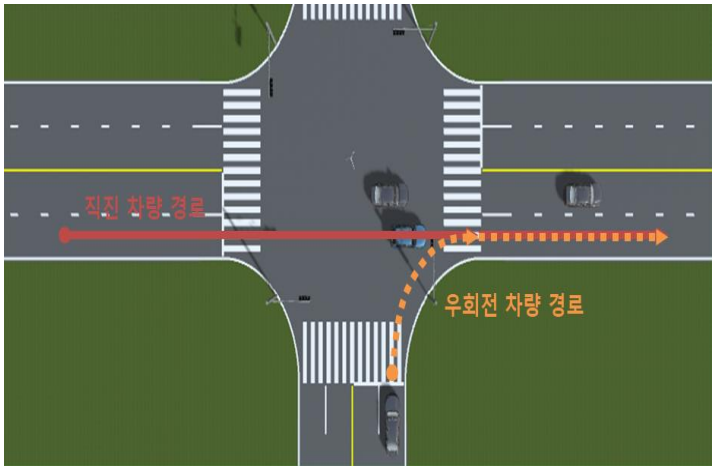
- 도심 교차로에 설치된 인프라 카메라에서 교차로에서 이동하는 객체들을 촬영하고 딥러닝 기반 이동 객체를 추출하고, 객체의 위치와 이동 속도 정보를 추정하여 동적정보 생성.
- RSU는 R2V 통신을 통해 생성된 교차로 동적 정보를 차량에게 전송



[협력센싱 시나리오의 개요]

○ 서비스 평가 시나리오

- RSU는 교차로 동적정보를 차량에게 전달하고, 차량이 도심 교차로에서 우회전 시에 교차로 동적정보를 이용하여 교차로 좌측 차선으로부터 직진하는 차량과의 상충을 예측하고 안전하게 우회전할 수 있는지를 평가함.



[협력센싱 서비스 평가 시나리오의 개념]

○ 평가 시나리오 도출 배경

- 도심 교차로에서 자율주행 차량의 우회전이 매우 어려운 문제로 대두되고 있음. 이는 우회전 시에 좌측 차선의 직진 차량과 우측 차선의 유턴 차량들과의 상충 위험이 매우 높기 때문임.
- 따라서, 이러한 문제를 해결하기 위해서 인프라 센서와 차량간의 협력센싱서비스가 필요하며, 따라서 협력센싱에 의한 문제 해결 성능을 평가하는 것이 필요함.

(나)-①-2. 협력 머뉴버링 서비스 평가 시나리오

○ 서비스 개요

- 자율주행차량 간에 V2V 통신을 통해 운전 머뉴버(driving intent trajectory)를 주변 차량에 전송함으로써, 차선 변경 등의 운전의도를 주변 차량에게 알려줌.

○ 협력 머뉴버링 서비스 평가 시나리오

- 회전 교차로에서 기 회전하고 있는 자율주행차량과 진입하려는 자율주행차량 사이에 V2V 통신을 통해 운전 머뉴버를 상호 교환하여, 진입하는 차량이 기존 차량과 상충되지 않게 얼마나 빨리 진입하고 교차로를 통과할 수 있는지를 평가함.



[협력머뉴버링 성능분석 환경]

○ 평가 시나리오 도출 배경

- 회전 교차로에서 자율주행 차량의 진입 및 출입이 매우 어려운 문제로 대두되고 있음. 이는 교차로 내의 차량들의 운전의도를 모를 경우에 진입하려는 차량과 직진 차량들과의 상충 위험이 매우 높기 때문임.
- 따라서, 이러한 문제를 해결하기 위해서 각 차량들의 운전의도 공유하는 협력머뉴버링서비스가 필요하며, 이에 의한 문제 해결 성능을 평가하는 것이 필요함.

(나)-② 협력자율주행 메시지 포맷 개발

○ 기존 V2X 통신 메시지를 구현함.

- 교차로 신호등의 SPaT와 MAP 메시지 구현. 각 차량의 BSM 메시지 구현

○ 협력센싱 메시지 포맷 개발

- 각 차량이나 인프라 센서에서 인지된 동적 객체의 정보를 주변 차량, 보행자, 인프라 등에 브로드캐스팅하는 메시지
- 동적으로 부여되는 객체 id, 각 객체가 인지된 시간, 객체의 종류(보행자, 자전거, 승용차, 버스, 트럭 등), 각 객체의 절대 GPS 좌표, 이동방향, 그리고 이동속도 정보를 포함하는 협력센싱메시지를 생성

객체 id	time_stamp	객체 class	GPS 좌표	방향	속도
1	t_1	승용차	(x_1, y_1, z_1)	θ_1	v_1
2	t_2	보행자	(x_2, y_2, z_2)	θ_2	v_2
…			…	…	…
N	t_N	자전거	(x_N, y_N, z_N)	θ_N	v_N

- 객체 id는 인프라 센서가 인지하는 객체에게 부여하는 임시 id 임. 해당 인프라 센서의 센싱 범위 내에서의 tracking에 사용함.
- time_stamp는 해당 객체가 센싱된 시간을 나타냄.
- 객체 class는 센싱된 객체가 딥러닝에 의해 분류되는 객체의 종류에 해당함.
- 좌표는 해당 객체의 절대 위치를 나타냄. 절대 위치 추정을 위해 정밀지도와의 matching 기술이 요구됨.
- 방향은 해당 객체가 이동하는 방향을 나타냄.
- 속도는 해당 객체의 이동속도를 나타냄.
- 앞으로 개발될 구체적인 서비스 시나리오에 따라 추가적인 정보가 포함될 수 있음.

○ 협력머뉴버링 메시지 포맷 개발

- 자율주행차량의 운전 머뉴버(우회전, 좌회전, 차선변경, 속도 증감 등)를 주변 차량에 브로드캐스팅하는 메시지
- 자율주행차는 차선변경과 같은 중요한 머뉴버 변경을 하고자 할 때, 현재 자 차(ego vehicle) 위치에서 머뉴버 변경에 의해 발생할 3.5초 이후까지 이동 궤적을 0.1초 간격으로 생성하여 전송하는 운전의도궤적(Driving Intent Trajectory, DIT) 메시지를 생성

자차 id	time_stamp	GPS 좌표	방향	속도
n	t_1	(x_1, y_1, z_1)	θ_1	v_1
	t_2	(x_2, y_2, z_2)	θ_2	v_2
	…	…	…	…
	t_N	(x_N, y_N, z_N)	θ_N	v_N

- 자차 id는 자 차의 id를 의미함.

- 첫 번째 행은 자 차가 t_1 초 후에 (x_1, y_1, z_1) 위치에 도달하고, 그 때의 방향은 θ_1이고 속도는 v_1이다라는 것을 의미함.
- 따라서, t_1 초에서 t_N초 까지의 이동할 궤적과 각각의 운행 상태를 포함하는 메시지 임.
- 앞으로 개발될 구체적인 서비스 시나리오에 따라 추가적인 정보가 포함될 수 있음.

(다) 협력자율주행 트래픽 시뮬레이터 개발 및 V2V 메시지 성능 검증

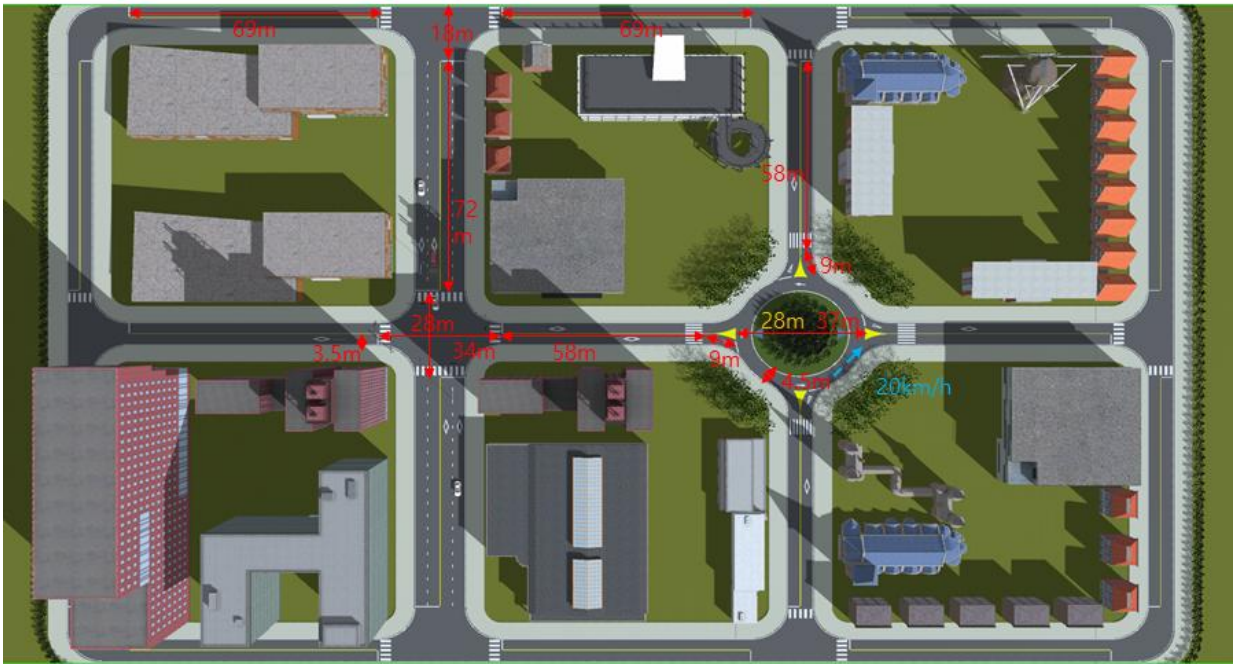
(다)-① 협력자율주행 트래픽 시뮬레이터 개발

(다)-①-1. 협력자율주행 시뮬레이션을 위한 가상환경 구축

○ Prescan 기반으로 신호등 교차로에서 우회전하고 회전 교차로에 진입하여 통과하는 시나리오에 대한 도심 가상 운행 환경을 구축함.

○ Prescan을 기반으로 협력자율주행 서비스 평가를 위한 신호등 교차로 및 회전 교차로를 포함하는 도심 가상 운행 환경을 구축함.

- 신호등 교차로 및 회전교차로 설계 지침에 따라, 도로를 설계하고 가상환경 도로 환경 구현함.
- 도심 도로 환경을 모델링하기 위한 빌딩, 가로수, 표지판, 횡단보도, 그리고 그림자 등을 구현함.
- 신호등 교차로의 신호등을 모델링하고 신호제어기와 연동된 RSU가 SpaT, MAP 메시지를 차량에게 전송하는 것을 구현함.
- 신호등 교차로와 회전교차로에서 운행하는 다수의 일반 차량들을 모델링하고 구현함.

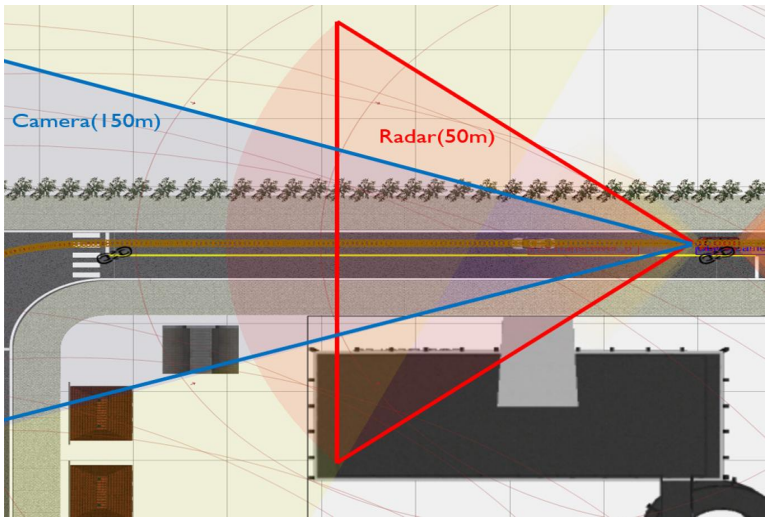


[협력자율주행 서비스 평가를 위해 구축된 도심 교통환경 모델]

(다)-①-2. 가상환경 시뮬레이션 검증을 위한 자율주행차량 모델링

○ 시나리오에 따른 협력자율주행 성능을 분석하기 위해, Prescan 시뮬레이션 상에서 동작하는 자율주행 차량의 인지, 판단, 제어 기능을 모델링함.

- 자율주행 차량에 사용된 센서
  - ✓ Camera sensor (거리 150m, 각도 40도)
  - ✓ Radar sensor (거리 50m, 각도 80도)
  - ✓ lidar sensor (120m, 32CH, 각도 360도)



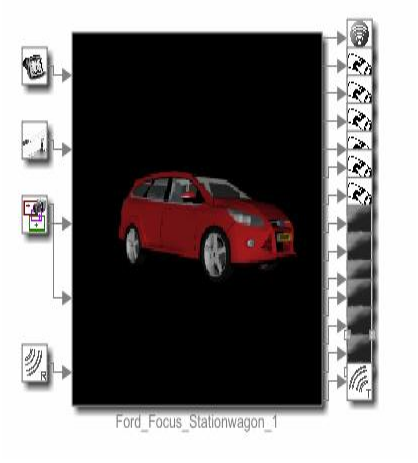


[가상환경 검증을 위한 자율주행 차량 내부]

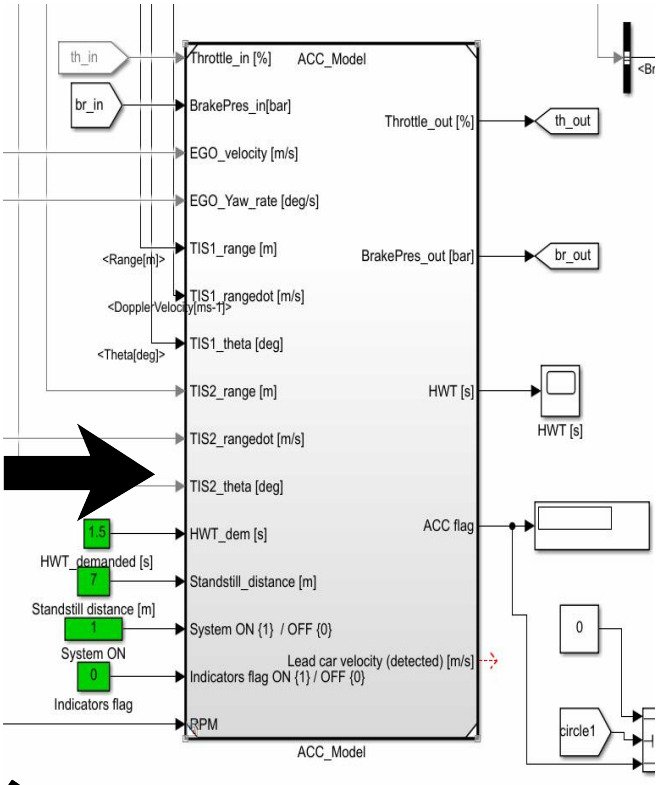
✓ 정해진 경로를 추종하는 횡방향 및 종방향 판단 및 제어 알고리즘 구현함.

✓ 교차로 교통 신호 인식(V2X 통신 기반)에 따른 교차로 통과 알고리즘 구현함.

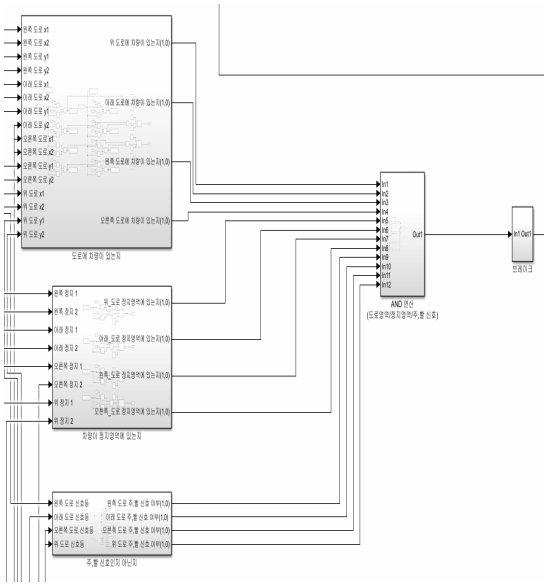
✓ V2X 메시지 구현 및 송수신 구현함.



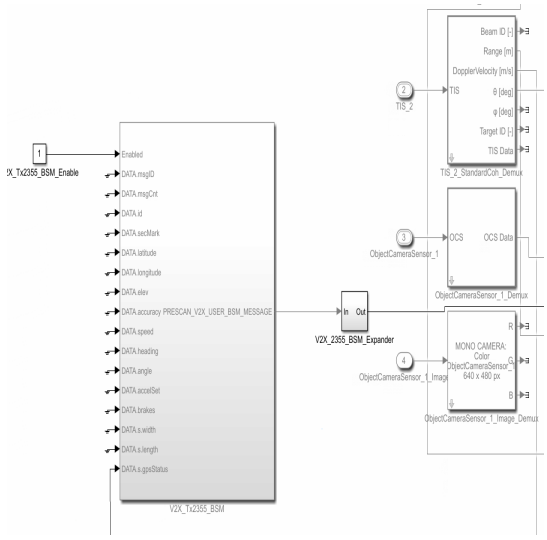
[자율주행차량(Ego car)]



[자율주행 판단 및 제어 알고리즘]



[교통 신호 지키는 알고리즘]



[센서와 V2X 통신 기반 인지]

[자율주행 차량 모델링]

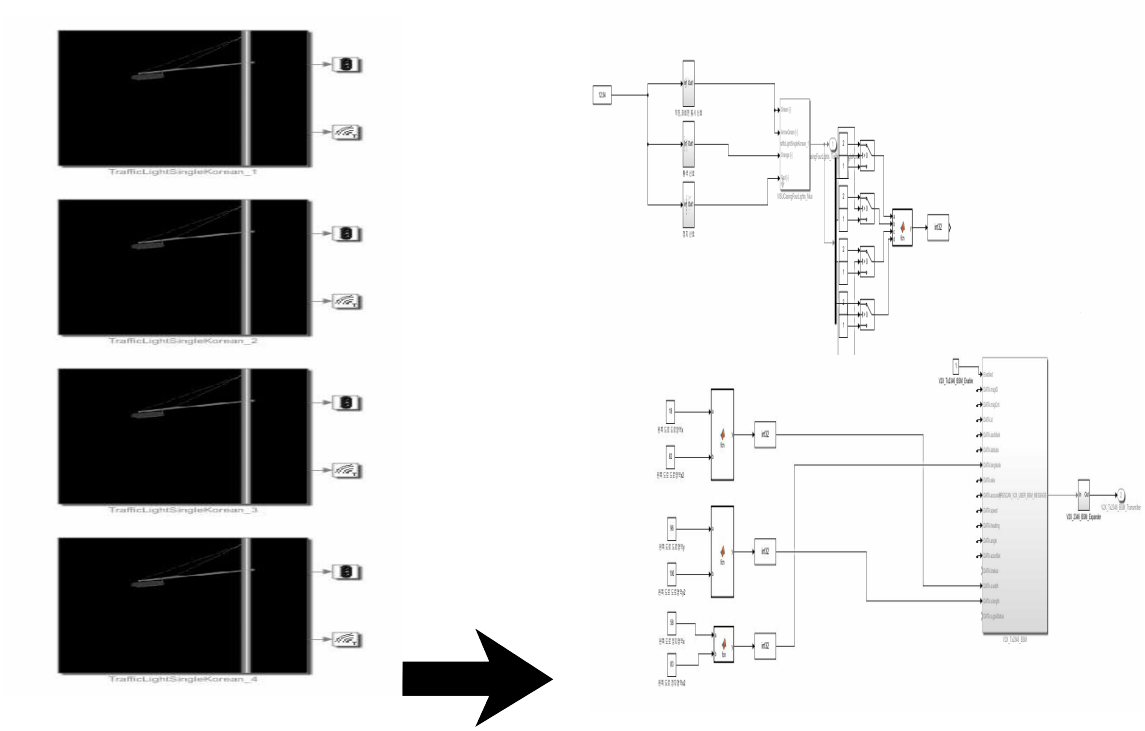
(다)-①-3. 협력자율주행 메시지 구현 및 V2X 통신 시뮬레이션

○ C-ITS V2X 통신 모델링

- C-ITS 서비스를 위한 기존 C-ITS 메시지(SpaT, MAP, BSM) 구현함.
- 신호 교차로 통과 시에 신호제어기와 연동된 RSU가 100ms 주기로 SpaT(Signal Phase and Time), MAP 메시지 전송. 자율주행 차량과 일반 차량은 SPaT 메시지를 수신하여 교차로 신호를 식별함.
- 자율주행 차량 및 일반 차량들은 100ms 주기로 BSM(Basic Safety Message) 메시지를 송신하고, 주변 차량으로부터 수신된 BSM 메시지 정보를 이용하여 주변 차량의 운행 상태를 인지함.

○ 협력자율주행 V2X 통신 모델링

- 본 과제에서 개발된 협력센싱 메시지와 협력머뉴버링 메시지를 구현함.
- 도심 교차로에 설치된 인프라 카메라에서 교차로에서 이동하는 객체들을 촬영하고 딥러닝 기반 이동 객체를 추출하고, 객체의 위치와 이동 속도 정보를 추정하여 동적정보를 생성함. RSU는 R2V 통신을 통해 교차로 동적 정보를 자율주행 차량에게 전송함.
- 자율주행차량은 V2V 통신을 통해 운전 머뉴버(driving intent trajectory)를 주변 차량에 전송함으로써, 차선 변경 등의 운전의도를 주변 차량에게 알려줌. 회전 교차로에서 기 회전하고 있는 자율주행차량과 진입하려는 자율주행차량 사이에 V2V 통신을 통해 운전 머뉴버를 상호 교환함.

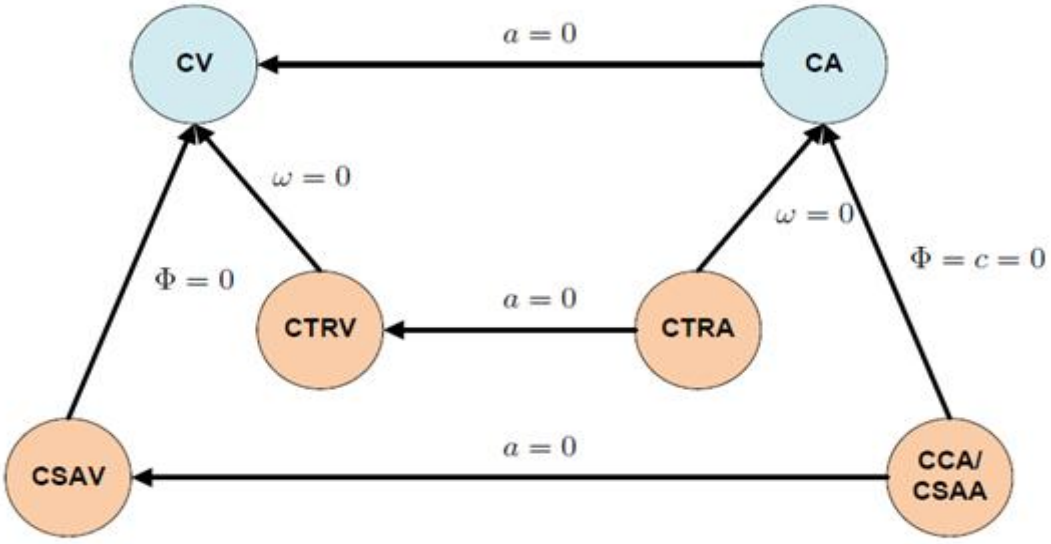


[교차로 신호 제어와 V2X 메시지 전송 알고리즘]

(다)-①-4. 자율주행 차량의 신호교차로 우회전 및 회전교차로 진입 및 통과 알고리즘

○ 도심 환경에서 자율주행 차량의 통과가 어려운 신호교차로 우회전 및 회전교차로 통과 알고리즘 개발함.

- 자율주행 차량은 교차로 우회전 시에, 좌측 직진 차선에서 주행하고 있는 차량들로부터 수신된 BSM과 RSU로부터 수신된 협력센싱메시지를 통해, 교차로 부근 동적 정보를 인지함. 인지 정보를 이용하여 좌측 직진 차선에서 주행하고 있는 차량들의 경로 예측 및 상충 가능성을 계산하고, 상충 확률이 일정 값 이하일 경우 우회전을 진행함.
- 회전 교차로에서 기 회전하고 있는 자율주행차량과 진입하려는 자율주행차량 사이에 V2V 통신을 통해 운전 머뉴버 메시지를 상호 교환하여, 진입하는 차량과 기존 차량들의 경로 예측 및 상충 가능성을 계산하고, 상충 확률이 일정 값 이하 일 경우 회전 교차로 통과를 진행함.
- 상대 차량들의 경로를 예측하고 자 차와의 상충 확률을 예측하는데 사용된 알고리즘은, 일반적으로 가장 널리 사용되는 고정된 값의 차량의 가속도와 핸들의 각속도 모델을 적용하는 CTRA(Constant Turn Rate and Acceleration) 임.



[Overview about linear and curvilinear motion models[20]]

○ CTRA(Constant Turn Rate and Acceleration) 모델

- x,y는 차량의 위치 좌표를 나타내며, 차량의 heading은 θ, 차량의 속도는 v, 차량의 가속도는 a, 차량의 yaw rate는 ω를 의미함. CTRA의 상태 공간 모델은 다음과 같음.

$$\vec{x}(t) = \begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \\ \theta(t) \\ v(t) \\ a \\ \omega \end{pmatrix}$$

- 상태공간은 시간 t가 증가함에 따라 상태 점이 그 공간을 이동하며 동적인 특성궤도를 보여주는 공간을 말함. CTRA 모델에 대한 상태 방정식은 다음과 같음.

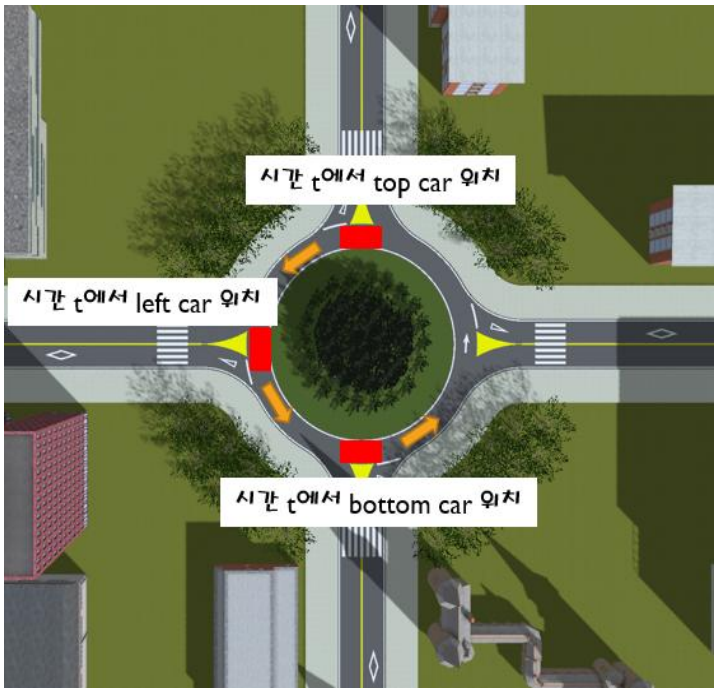
$$\vec{x}(t+\Delta t)=\begin{pmatrix} x(t+\Delta t) \\ y(t+\Delta t) \\ \theta(t+\Delta t) \\ v(t+\Delta t) \\ a \\ \omega \end{pmatrix}=\vec{x}(t)+\begin{pmatrix} \Delta x(\Delta t) \\ \Delta y(\Delta t)) \\ \omega\Delta t \\ a\Delta t \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

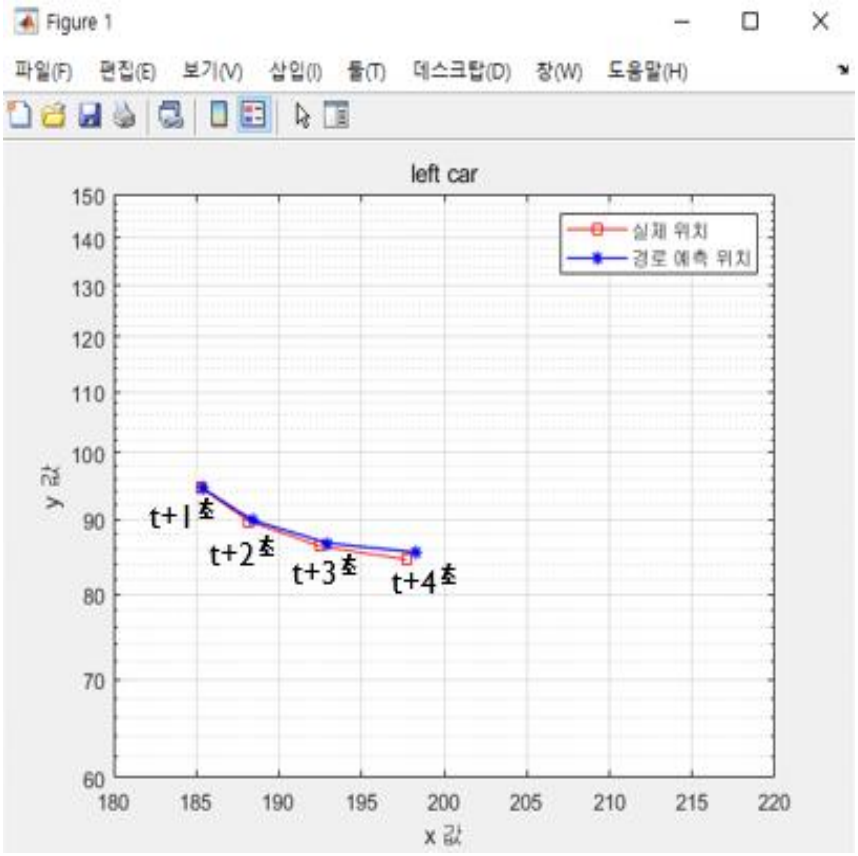
- 여기서 구하고자 하는 △x,△y값은 상태 방정식을 이용하여 다음과 같이 구함.

$$\Delta x(\Delta t)=\frac{1}{\omega^2}[(v(t)\omega+a\omega\Delta t)\sin(\theta(t)+\omega\Delta t)+a^*\cos(\theta(t)+\omega\Delta t)-v(t)\omega^*\sin\theta(t)-a^*\cos\theta(t)]$$

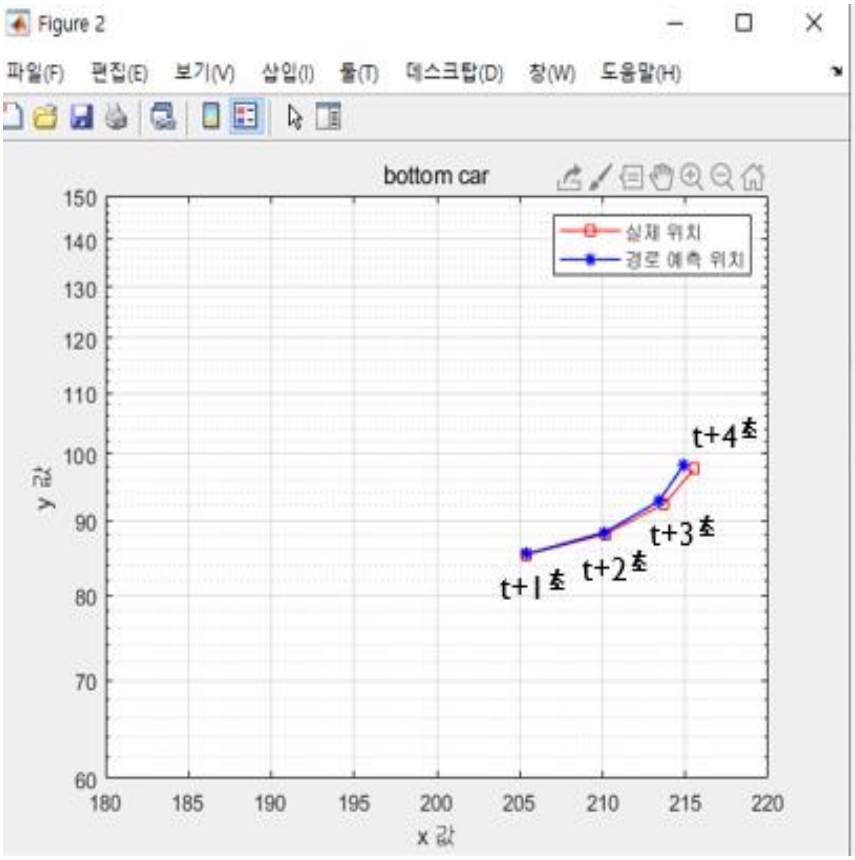
$$\Delta y(\Delta t)=\frac{1}{\omega^2}[(-v(t)\omega+a\omega\Delta t)\cos(\theta(t)+\omega\Delta t)+a^*\sin(\theta(t)+\omega\Delta t)+v(t)\omega^*\sin\theta(t)-a^*\cos\theta(t)]$$

- 위 식으로 △t 동안 예측한 예측경로의 x축값과 y축값을 통해 예를 들어 현재 위치(t초)에서의 1,2,3,4초 후 상황을 밑에 그림과 같이 그래프를 얻을 수 있음.

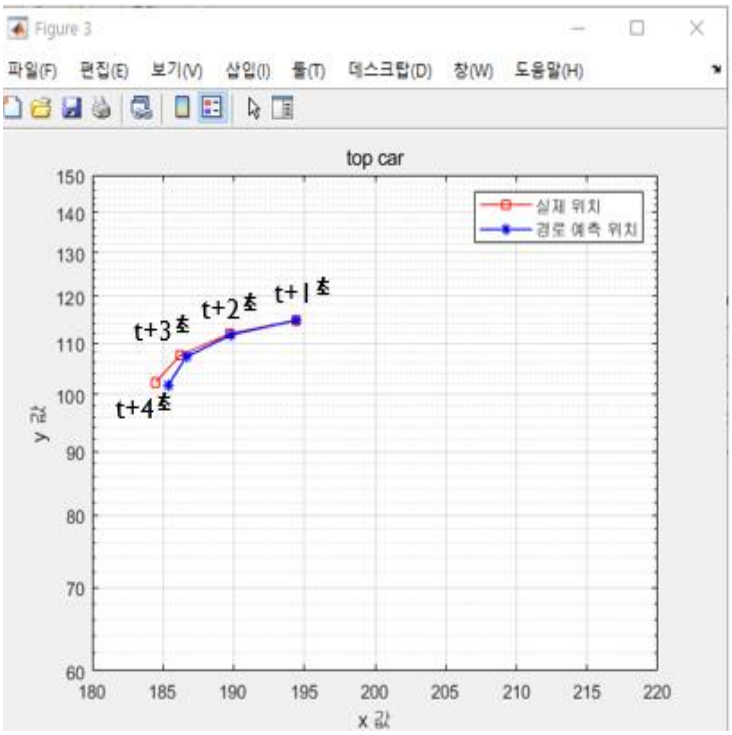




[Left car에 대한 경로 예측의 정확도]



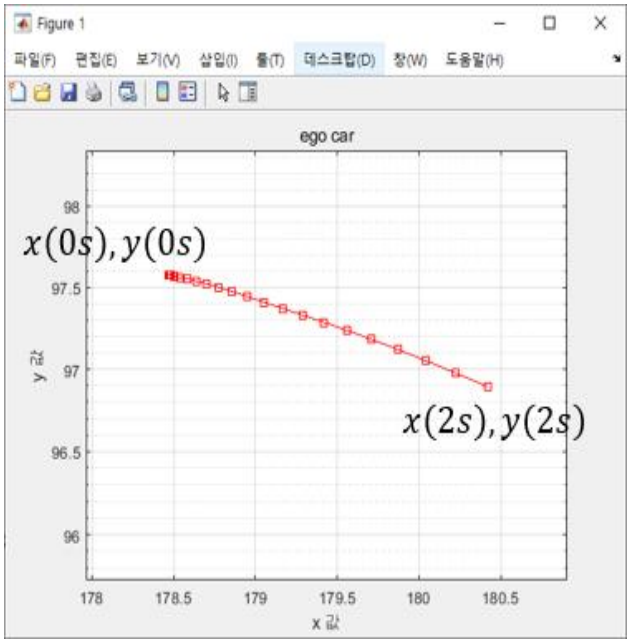
[Bottom car에 대한 경로 예측의 정확도]



[Top car에 대한 경로 예측의 정확도]

○ 시뮬레이션 충돌 예측 모델

- 본 시뮬레이션에서 회전교차로에 진입하는 자율주행차량과 회전교차로 내에 있는 차량 간의 충돌 예측을 위해 다음과 같이 모델링함.
- 자율주행차량 : 회전교차로에 진입하기 직전 정지한 상황을 0초로 두고 0.1초 간격으로 2 초까지의 진입하는 상황을 profile로 저장함



$$\begin{pmatrix} x(0s) & y(0s) \\ x(0.1s) & y(0.1s) \\ x(0.2s) & y(0.2s) \\ \vdots & \vdots \\ x(1.9s) & y(1.9s) \\ x(2s) & y(2s) \end{pmatrix}$$

$21 \times 2\ matrix$

[자율주행 차량의 회전교차로 진입 profile]

- 회전교차로 내 차량 – 현재 위치 좌표에서 0.1초 간격으로 2초까지 예측 경로를 계산함.

$$\begin{pmatrix} x_1(t+0s) & y_1(t+0s) \\ x_1(t+0.1s) & y_1(t+0.1s) \\ x_1(t+0.2s) & y_1(t+0.2s) \\ \vdots & \vdots \\ x_1(t+1.9s) & y_1(t+1.9s) \\ x_1(t+2s) & y_1(t+2s) \end{pmatrix}$$

$21 \times 2\ matrix$

- 위 2개의 식으로 두 점 사이 직선거리를 구함.

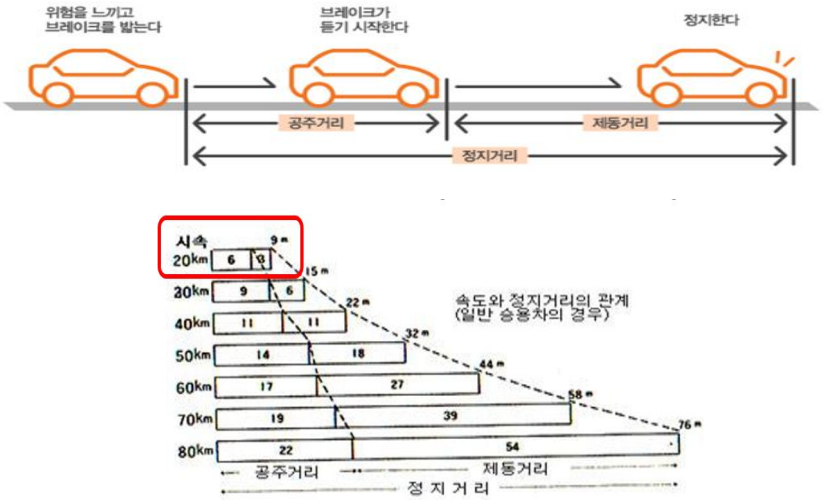
$$\begin{pmatrix} \sqrt{(x(0s)-x_1(t+0s))^2+(y(0s)-y_1(t+0s))^2} \\ \sqrt{(x(0.1s)-x_1(t+0.1s))^2+(y(0.1s)-y_1(t+0.1s))^2} \\ \sqrt{(x(0.2s)-x_1(t+0.2s))^2+(y(0.2s)-y_1(t+0.2s))^2} \\ \vdots \\ \sqrt{(x(1.9s)-x_1(t+1.9s))^2+(y(1.9s)-y_1(t+1.9s))^2} \\ \sqrt{(x(2s)-x_1(t+2s))^2+(y(2s)-y_1(t+2s))^2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ \vdots \\ d_{20} \\ d_{21} \end{pmatrix}$$

- 밑에 식과 같이 회전교차로에 진입하는 자율차량과 회전교차로 내에 있는 차량 간의 거리를 0.1초 간격으로 2초 후 까지 각각 계산해서 하나라도 11m보다 작으면 자율주행차량에 충돌 경고를 발생시키고 제동이 시작됨.

$$d_k < 11m\ (k = 1,2,3 \cdots 20,21)$$

○ 정지거리

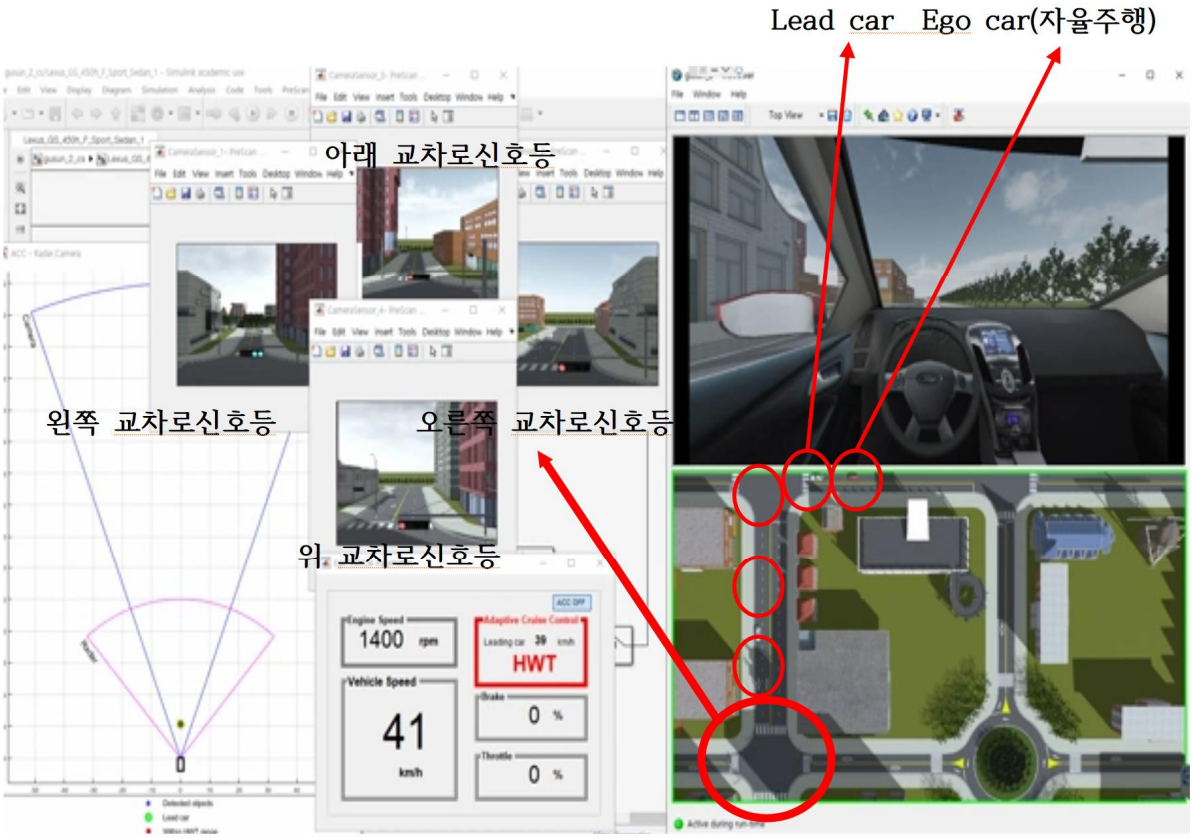
- 본 시뮬레이션에서 회전교차로 속도는 20km/h이므로 9m가 정지거리이나 차량의 좌표가 차량의 끝이 아니라 차량의 가운데보다 약간 앞을 나타내므로 11m를 정지거리 값으로 설정함.



[속도에 따른 정지거리[21]]

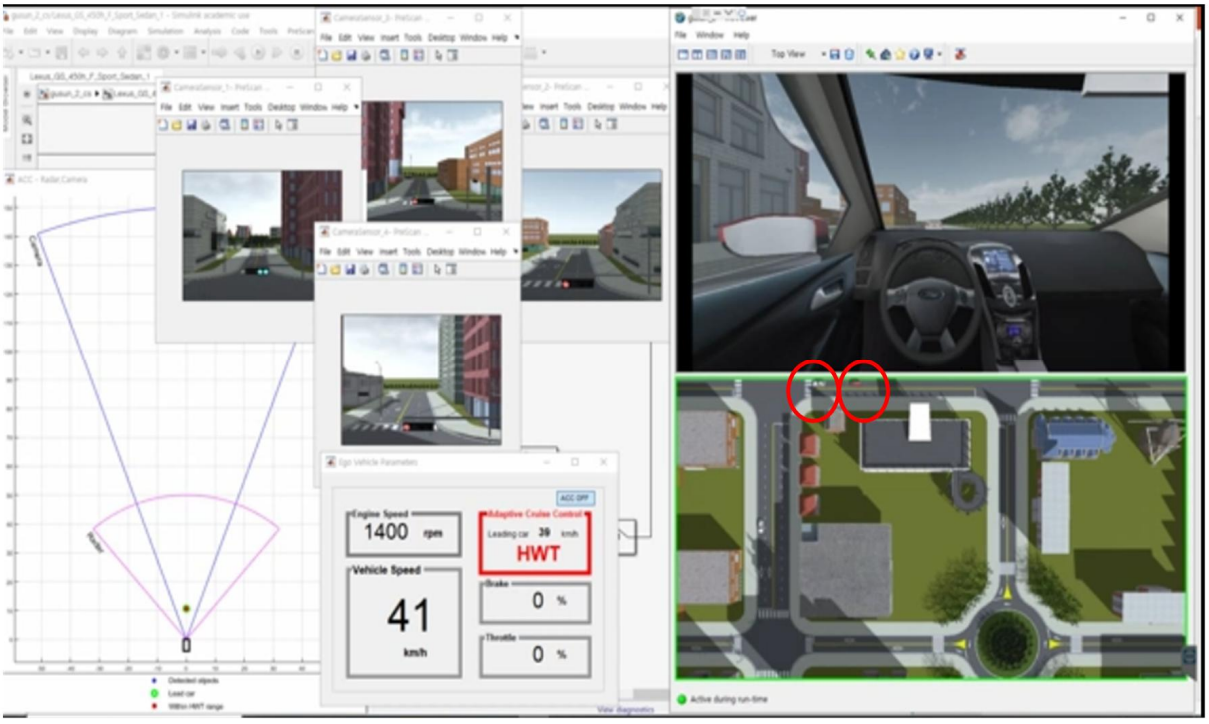
(다)-①-5. 가상환경 테스트 운행을 통한 자율주행 시뮬레이터 분석 및 검증

○ 자율주행 차량을 가상환경에서 테스트 운행를 수행하여 개발된 시뮬레이터에 대한 최적화를 수행하고, 검증을 수행함.

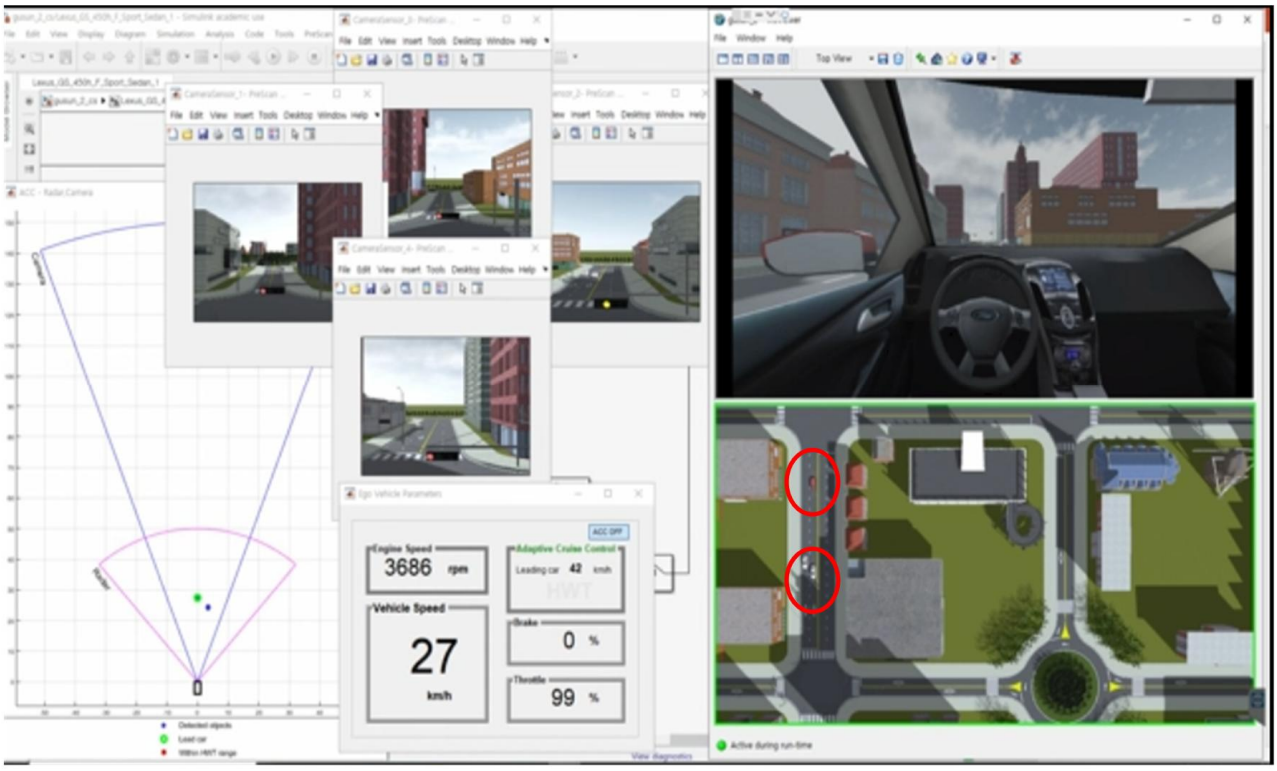


[시뮬레이션 결과를 보여주는 윈도우의 구성]

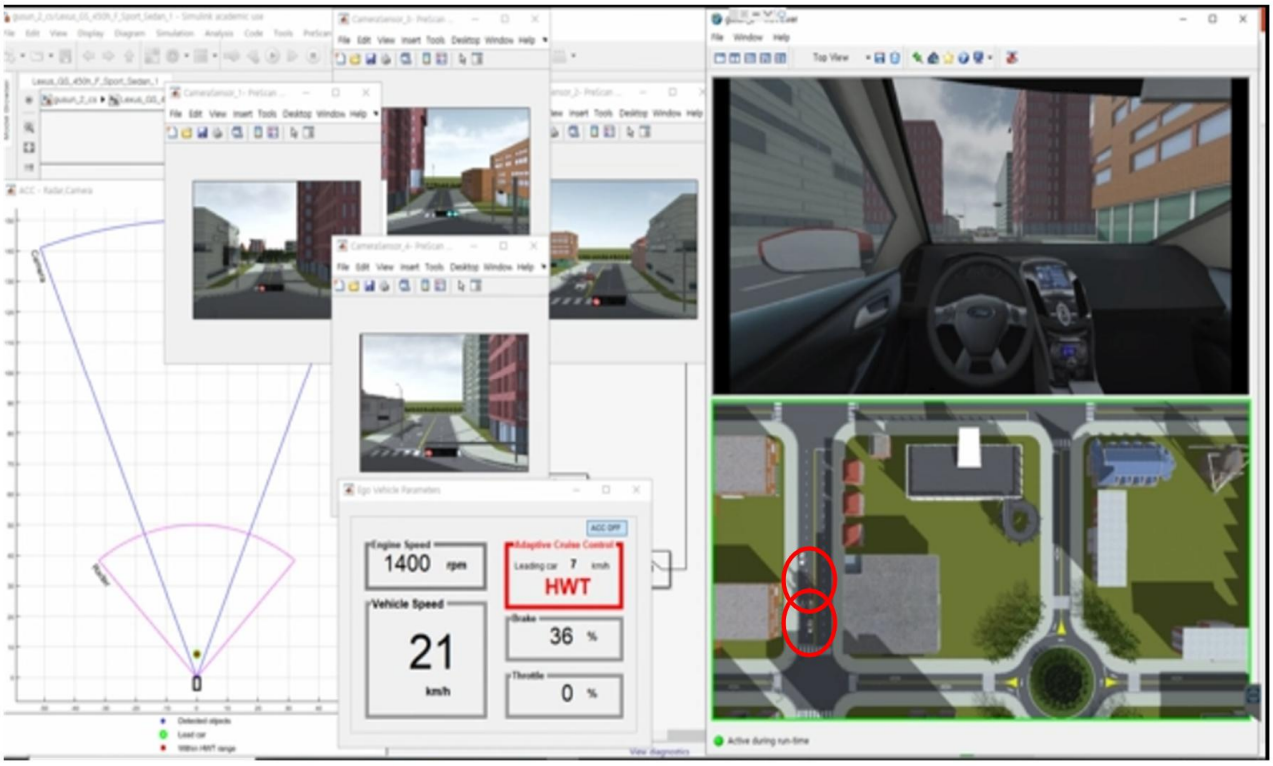
① 자율주행 차량이 인지/판단/제어 자율주행 알고리즘을 통해 일반 차량과 일정 간격을 유지하면서 주행



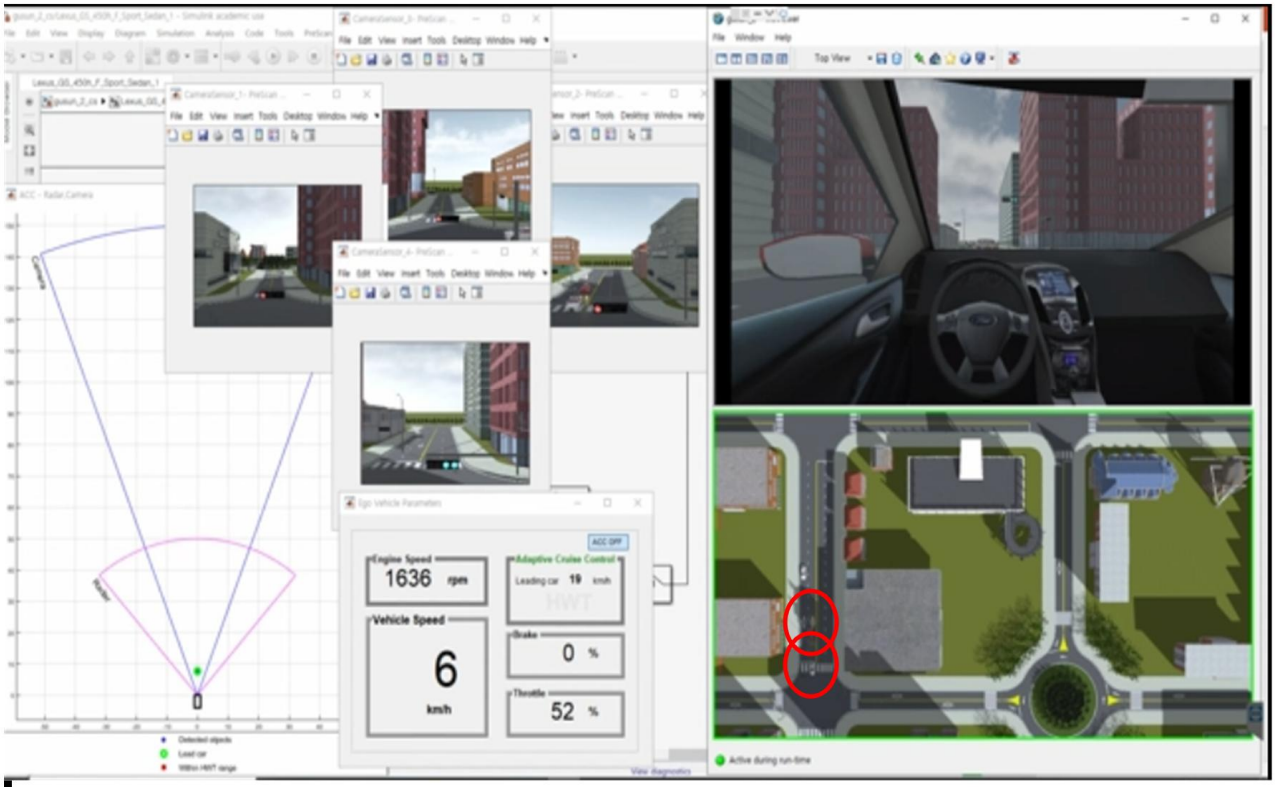
② 자율주행 차량과 일반 차량과의 간격이 증가하면서 자율주행 차량 단독의 자율주행 수행



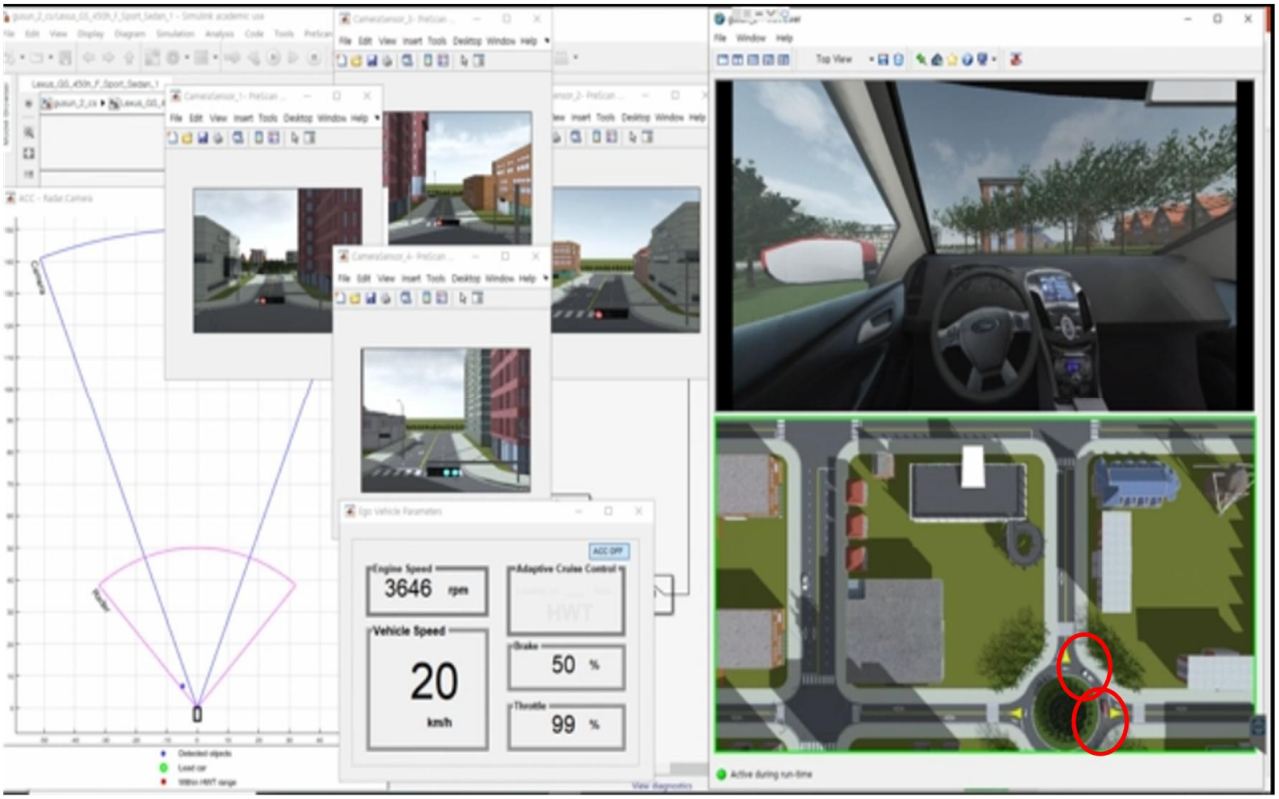
③ 자율주행 차량은 신호제어기와 연동된 RSU로부터 SPaT 메시지를 수신하고, 교차로 신호가 정치 신호임을 식별하고 속도를 감속하고, 정지선 앞에서 정지함.



④ 교차로 신호등이 초록불로 변함을 SPaT 메시지로부터 수신하고, 자율주행 차량 가속 시작함

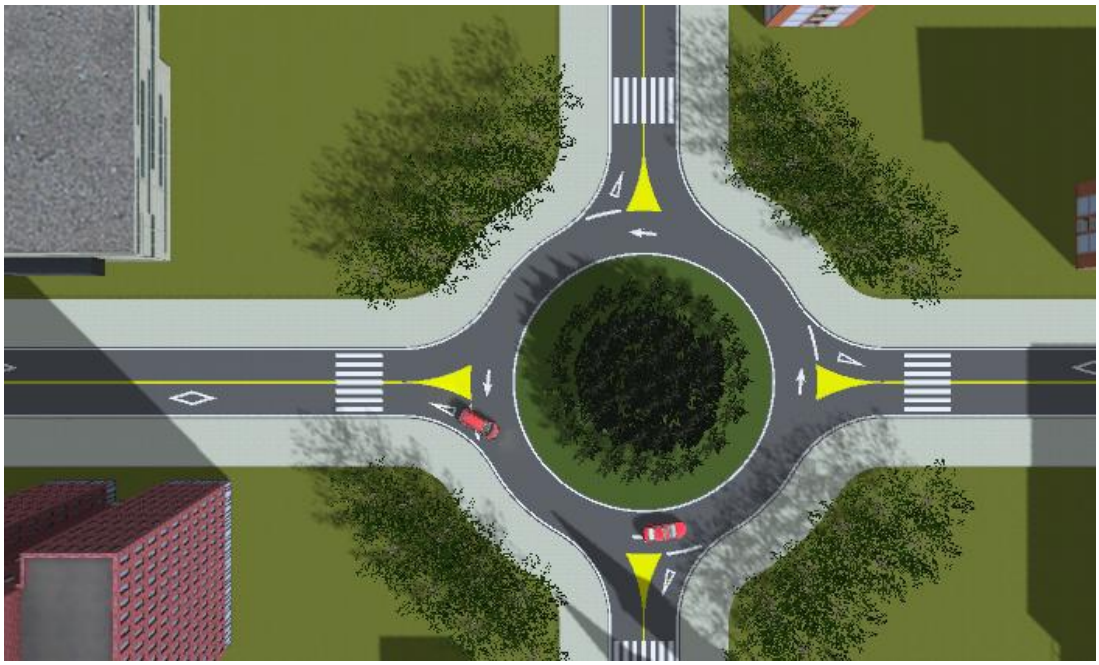


⑤ 자율주행 차량이 회전교차로에서 진입하여 회전교차로 설계속도인 20km/h 준수하면서 이동함



○ 회전교차로 내에서 주행 중인 차량의 대수에 따른 자율주행 교차로 통과에 대한 성능을 분석함.

- 회전교차로 내에 차량 1대가 주행 중인 경우 (교차로 통과 O)



- 회전교차로 내에 차량 2대가 주행 중인 경우 (교차로 통과 O)



- 회전교차로 내에 차량 3대가 주행 중인 경우 (교차로 통과 O)



- 회전교차로 내에 차량 4대가 주행 중인 경우 (교차로 통과 O)



- 회전교차로 내에 차량 5대가 주행 중인 경우 (교차로 통과 ×)



- 설계속도 20km/h의 98m 길이의 회전교차로에서 회전교차로 내의 차량 밀도에 따른 개발된 알고리즘의 통행 성능을 분석함.
- 교차로 내의 차량이 4대 이하일 경우, 즉 차량간 평균 거리가 25m 이상일 경우에는, 기존 교차로를 운행하는 직진 차량과의 상충 없이 자율주행 차량이 회전교차로를 진입하고 통행을 할 수 있음.

회전교차로 내 차량 밀도	회전교차로 내 차량 간 거리	통행성공 여부
1대	98m	○
2대	49m	○
3대	32.6m	○
4대	24.5m	○
5대	19.6m	X
6대	16.4m	X

(다)-② V2V 메시지 성능 분석

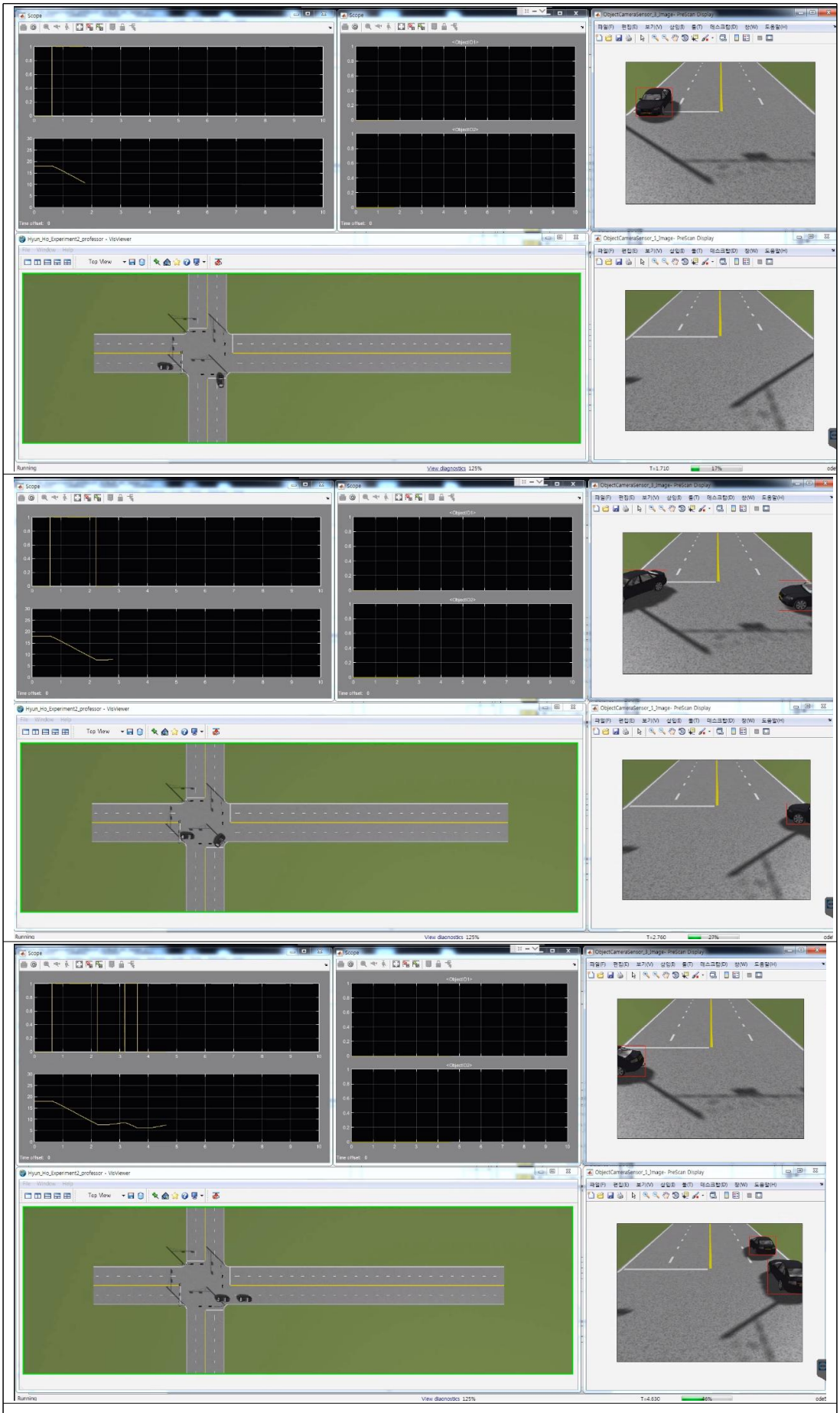
○ 협력센싱 메시지 성능 분석

- 협력센싱 서비스에 의해 RSU는 교차로 동적정보를 우회전 차량에게 전달하고, 우회전 차량이 교차로 동적정보를 이용하여 교차로 좌측 차선으로부터 직진하는 차량과의 상충을 예측하고 안전하게 우회전할 수 있는지를 평가함.
- 인프라 카메라에서 직진 차량을 센싱하고 인지 정보가 우회전 하는차량에게 전달되기까지의 E2E(End-to-End) 시간 지연과 직진 차량의 속도에 따라 우회전 가능 여부를 평가함.
- 아래 표와 그림은 E2E(End-to-End) 시간 지연과 직진 차량의 속도에 따른 우회전 가능 여부에 대한 시뮬레이션 결과를 보여줌.
- 직진 차량이 시속 60km/h 인 경우에는 E2E 지연이 350ms 이하 여야만, 직진 차량과 상충 없이 우회전이 가능함.
- 직진 차량이 시속 80km/h 인 경우에는 E2E 지연이 80ms 이하 여야만, 직진 차량과 상충 없이 우회전이 가능함.
- 직진 차량이 시속 100km/h 인 경우에는 E2E 지연이 0ms 이더라도, 직진 차량과 상충 없이 우회전이 불가능함.

Velocity / E2E delay	60km/h	80km/h	100km/h
0 ms	0	0	×
100ms	0	×	×
500ms	×	×	×

○ **협력센싱서비스의 성공 여부는 V2X 통신과 영상처리에서 발생하는 E2E 지연과 차량 속도에 많은 영향을 받음.**

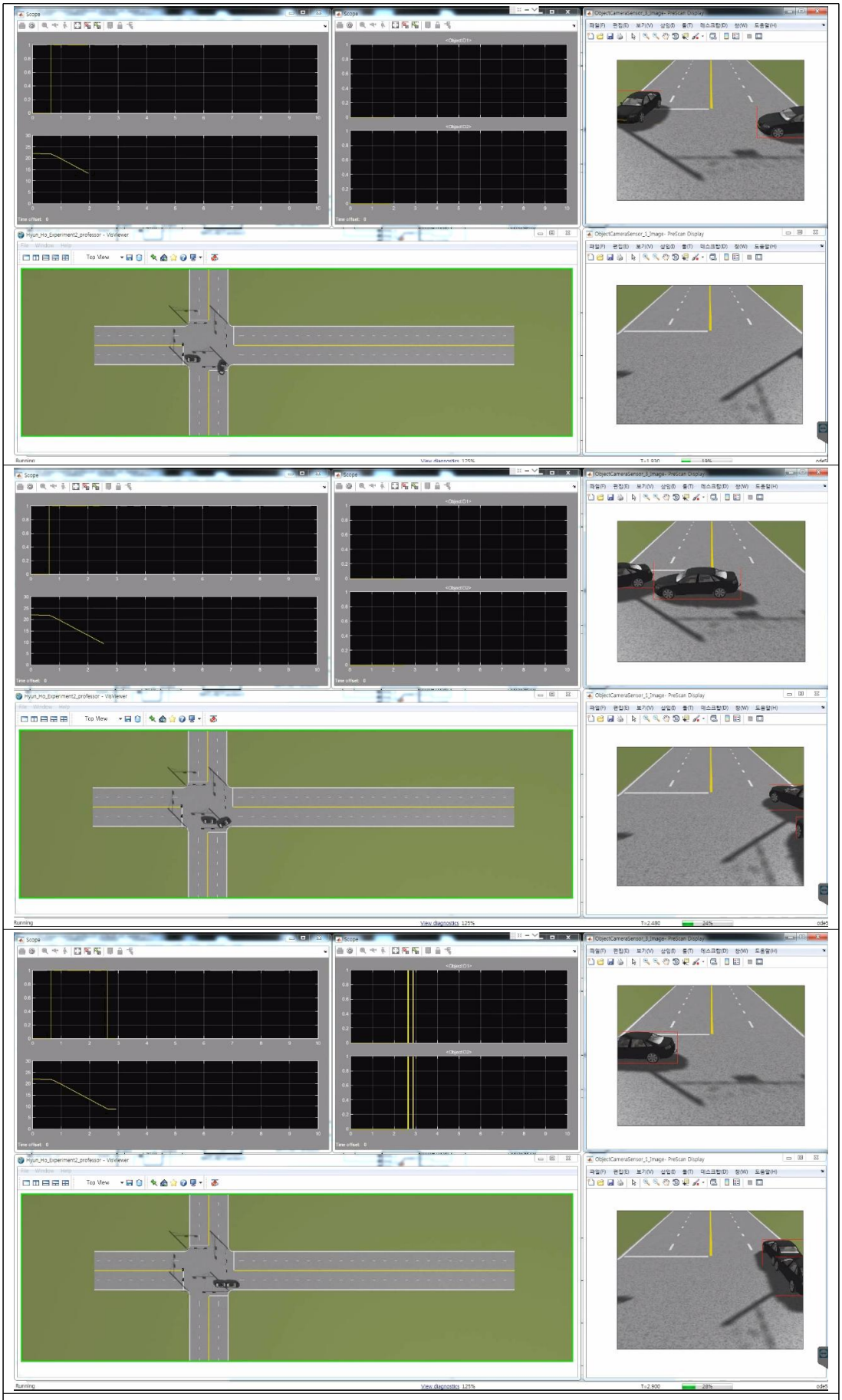
○ **따라서, 분산혼잡제어 기술 개발에 있어서 채널 혼잡도 CBR 뿐만 아니라, 상이한 차량의 운행 상태와 V2X QoS를 모두 고려할 수 있는 기술 개발이 필요함.**



직진차량 속도: 60km/h, E2E delay : 0ms, 상충 발생하지 않음



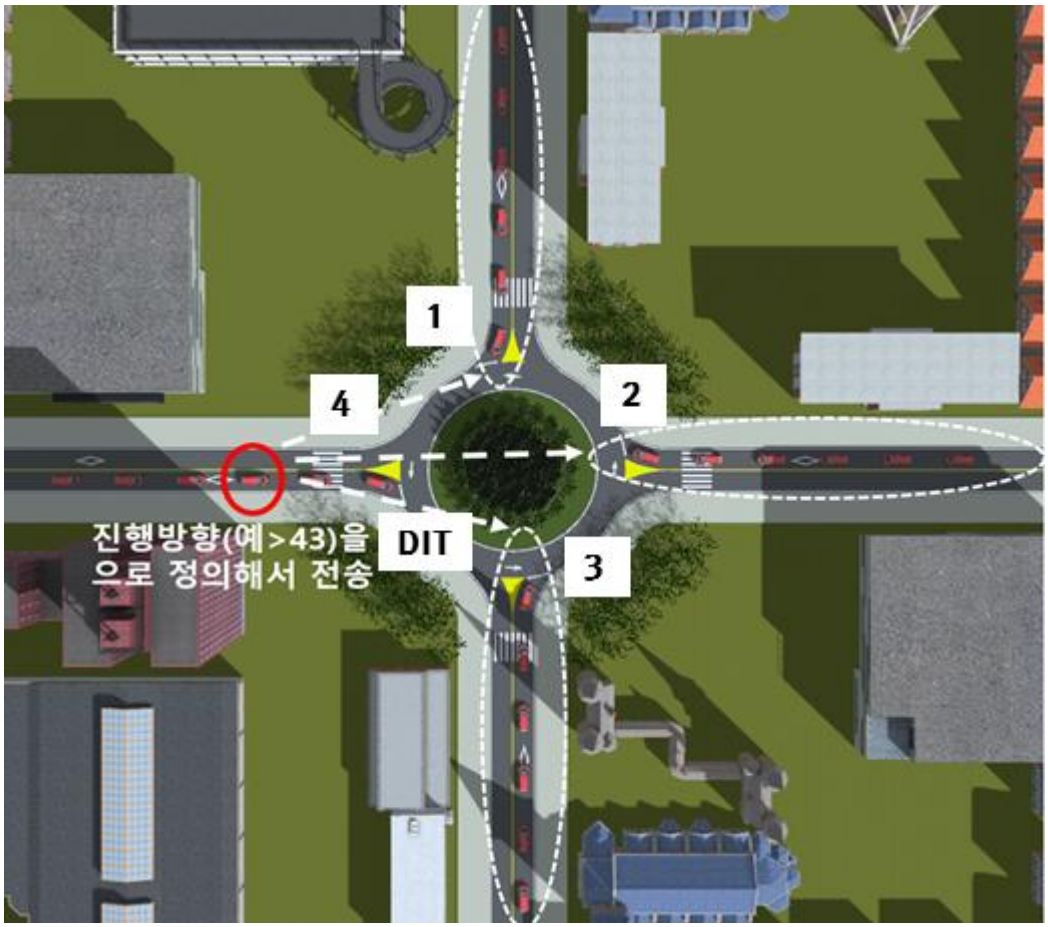
직진차량 속도: 60km/h, E2E delay = 500ms, 상충 발생



직진차량 속도: 80km/h, E2E delay = 100ms, 상층 발생

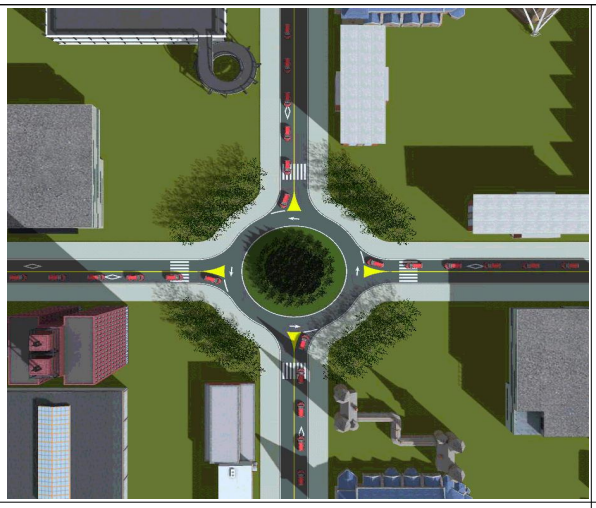
○ 협력머뉴버링 DIT 메시지를 사용하는 협력머뉴버링 성능 분석

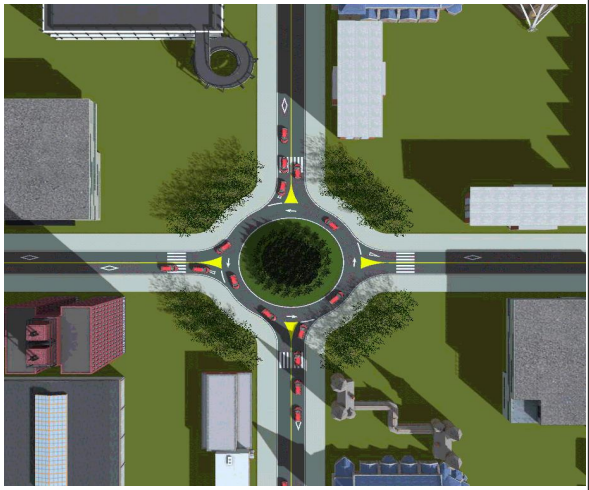
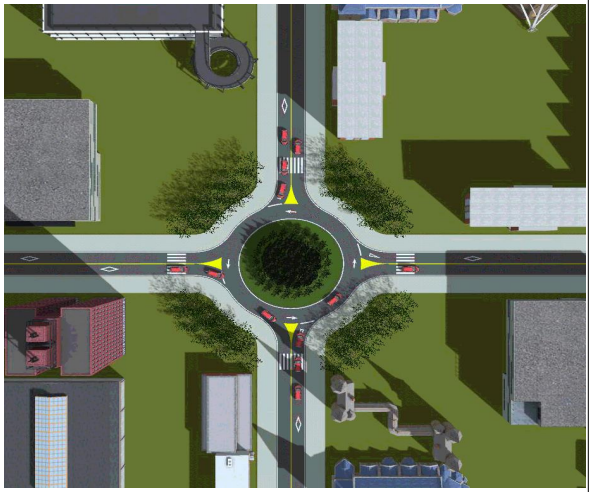
- 회전교차로에서 교차로에서 통행 중인 차량(교차로 트래픽 차량)들이 DIT 메시지를 사용할 경우와 사용하지 않을 경우, 자율주행 차량이 교차로에 진입하여 통과하는데 걸리는 시간 차이를 분석하는 시뮬레이션 수행
- 설명을 위해 각 회전교차로의 진입구를 아래 그림과 같이 1, 2, 3, 4로 하였을 때, 자율주행 차량이 4번에서 진입하여 3번으로 진출하겠다는 운전의도를 DIT 메시지로 작성하여 회전 교차로를 통과하고 있거나 대기하고 있는 18대의 자율주행 차량에게 20ms 단위로 전송함.
- 자율주행 차량들은 각 차량들의 DIT 메시지 수신 후에 CTRA(Constant Turn Rate Acceleration) 모델 기반으로 차량 경로를 예측하고, 회전 교차로를 통과
- 차량들의 DIT 메시지에 의해 각 차량의 운전의도 궤적으로부터 각 차량의 교차로 진입구과 출입구를 명확히 파악 가능함.
- 설계속도 20km/h의 98m 길이의 회전교차로에서, 협력머뉴버링 메시지를 이용하여 각 출입구에 대기 중인 6대의 차량, 총 24대의 차량이 회전교차로를 완전히 통과하는데 걸리는 시간을 분석함.



[회전교차로 진출입 운전의도를 협력머뉴버링 메시지로 전송]

경과 시간 (초)	협력머뉴버링 메시지 사용 안함	협력머뉴버링 메시지 사용

t=0		
t=10		
t=20		

t=30		
t=40		
		t=37초에 모두 통과
t=80		

○ 회전 교차로를 통과하고 있는 차량들의 DIT 메시지에 의해, 신규 진입 차량들이 회전 교차로 진행 차량들의 교차로 출입구를 명확히 인지할 수 있으므로, 신규 진입 차량들의 회전교차로 진입 시간이 단축되어, 전체 24대 자율주행 차량이 회전 교차로를 통과하는데 걸리는 시간이 80초에서 37초로 약 54% 감축됨.

협력머뉴버링 메시지 사용 여	24대 자율주행차 교차로 통과 소요 시간	성능 이득
X	80초	43초 단축
○	37초	

(라) 협력자율주행 트래픽 시뮬레이터와 cross-layer 시뮬레이터 통합

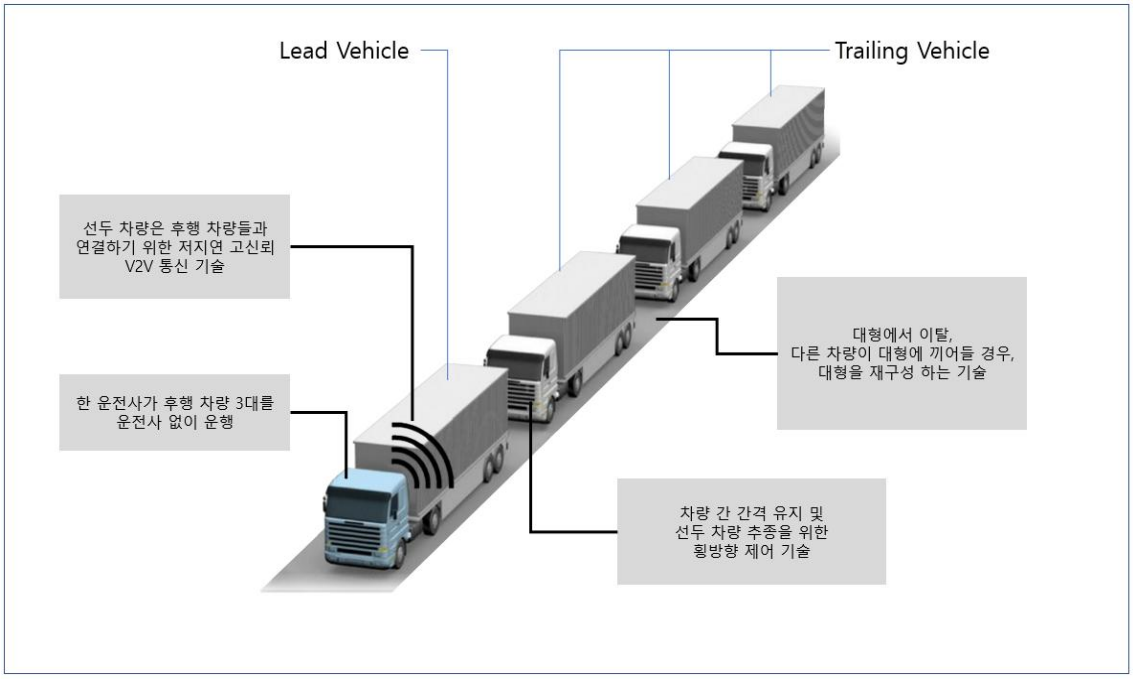
(라)-① 협력자율주행 트래픽 시뮬레이터 개발

(라)-①-1. 협력자율주행 시뮬레이션을 위한 가상환경 구축

○ Prescan 기반으로 직진 차선에서 5대의 차량이 군집을 이루어 군집자율주행 하는 가상환경을 구축함.

○ 군집자율주행 개념 정의[22]

- 군집자율주행은 다수의 차량이 일정한 간격을 두고 같은 궤적으로 주행하는 기술이며, 군집을 이끄는 선두 차량은 사람이 운전을 하고 후행 차량들은 사람의 개입 없이 선두 차량의 주행 궤적을 추종하면서 자율주행을 하도록 하는 기술임.
- 군집자율주행에 있어서 선두 차량은 사람이 운전을 하고, 선두 차량의 운행 궤적과 주행 상태 정보를 후행 차량들에게 차량 간 통신인 V2V(Vehicle to Vehicle)를 통해 전달하고 후행 차량들은 선행하는 유인 운전 차량으로부터 수신된 정보를 이용하여 선행 차량의 주행 궤적을 추종하도록 제어를 수행함.
- 따라서 군집자율주행에서 후행 차량의 자율주행 기술은 일반 자율주행 기술의 인지부와 판단부가 선행 차량의 운행 상태 정보와 V2V 통신에 의해 대체됨. 즉, 후행 차량은 주행 상황 판단, 주행 경로 생성, 그리고 주행 의도 결정을 독자적으로 하지 않고 V2V 토신을 통해 선행 차량으로부터 전달된 주행 궤적 및 운행 상태 정보를 이용하여 제어를 수행함.



[군집자율주행의 개념 (출처: PSA and Ministry of Transport)[23]]

(라)-①-2. 가상환경에서 군집자율주행을 위한 V2V 통신 모델링

○ 가상환경에서 5대가 군집을 이루어 군집자율주행을 수행하며, 군집주행의 선두 차량은 사람에 의한 제어를 가정하여 사전에 정해진 경로를 Prescan의 Path follower 기능을 이용하여 완벽하게 주행함.

○ 후행 차량들은 선두 차량의 궤적 및 운행 상태 정보를 V2V 통신을 통해 전달받아 선두 차량의 궤적을 따라 주행하도록 함. 구체적인 단계는 다음과 같음.

① V2V 통신을 통해 선두 차량은 첫 번째 후행 찰량으로 자신의 GPS 값과 현재 속도를 전송주기마다

송신함.

② 첫 번째 후행 차량은 선두 차량으로부터 받은 데이터를 순차적으로 1,000개를 모아서 주행 경로를 생성함. 이렇게 생성된 경로는 새로운 데이터가 들어오면 데이터가 순차적으로 제거되는 서큘러 큐(Circular Queue) 방식으로 계속해서 1,000개씩 유지 및 갱신됨.

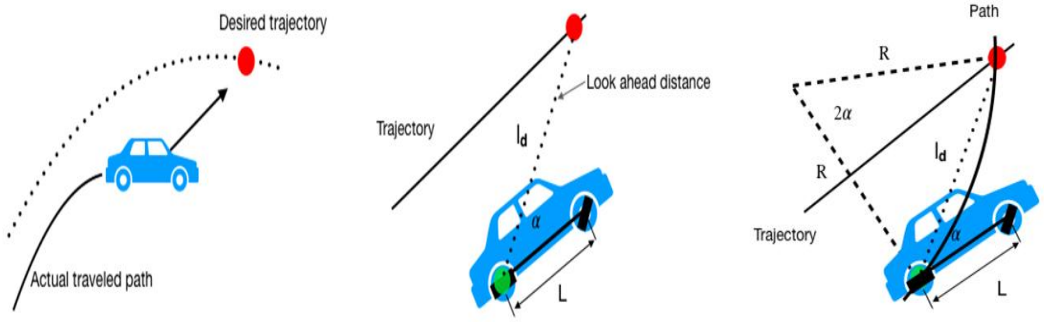
③ 첫 번째 후행차량은 갱신되는 경로 데이터 중 자신의 현재 위치와 가장 가까운 지점을 목표로 하여 주행함. 첫 번째 후행 차량은 주행함과 동시에 자신의 GPS 값과 속도를 V2V 통신을 통해 바로 뒤에 있는 두 번째 후행 차량에게 송신함.

④ 이렇듯 자신의 데이터를 바로 뒤에 있는 차량에게만 보내는 방식으로 수행하며 시뮬레이션이 종료될 때까지 반복함.

(라)-①-3. 가상환경에서 군집자율주행을 위한 경로 추종 알고리즘 모델링

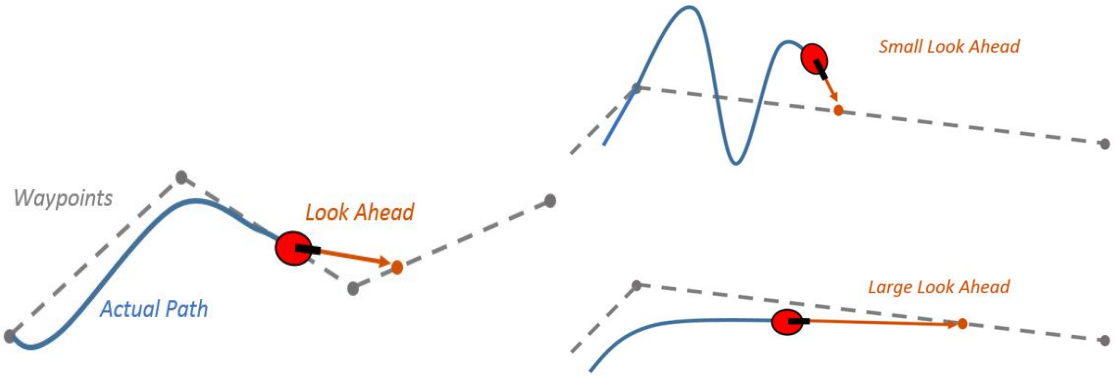
○ 후행 차량이 선행 차량의 경로 궤적을 추종하기 위해 pure pursuit 알고리즘을 사용함.

○ Pure pursuit 알고리즘은 차량이 현재 위치에서 목표점까지 이동하기 위한 곡률을 계산해 작동하는 경로 추종 알고리즘이며, 차량에서 일정 거리 앞에 위치한 경로상의 목표점을 선택하는 방식으로 수행됨.



[Pure pursuit 경로 추종 알고리즘의 개념 1[24]]

○ 위에 위치한 그림에서 차량이 목표 지점을 빨간색 점으로 지정하였을 때, 후륜이 차량의 기준점으로 사용되며, 뒤쪽 바퀴와 목표 지점간의 거리(Look Ahead Distance)는 l_d이며, 차량의 차체 방향과 경로 주행선 사이의 각도를 α라 하고, 반경은 R이며, 차량의 후륜에서 전륜까지의 길이는 L임.



[Pure pursuit 경로 추종 알고리즘의 개념 2[25]]

○ 위에 위치한 그림에서 차량이 경로로 빠르게 복귀해야 하는 경우에는 Look Ahead Distance를 짧게 설정해야함.

○ 그러나 너무 짧게 설정할 경우, 횡방향 진동이 심해짐. 차량이 경로를 부드럽게 주행하기 위해서는 Look Ahead Distance를 길게 설정해야함. 하지만 너무 길게 설정할 경우, 모서리 근처에서 더 큰 곡률이 발생하며 경로 추종의 성능이 저하될 수 있음.

○ 가상환경 내 군집자율주행 차량에 설계한 pure pursuit 알고리즘에 사용된 자동차 모델은 simple bicycle model을 사용했으며, 알고리즘은 다음 순서도와 같이 동작함.

① 각 차량은 V2V 통신을 통해 선행 차량으로부터 수신 받은 좌표와 속도를 저장함.

② 각 차량의 위치(x, y, heading) 및 속도를 추정하여 저장하고, V2V 통신을 통해 수신된 선행 차량의 위치와 속도를 비교함.

③ 각 차량은 수신 받은 선행 차량의 좌표와 현재 위치에서 가장 가까운 목표점을 찾음. 이 때 목표점은 Small Look Ahead Distance, Large Look Ahead Distance 모두 고려하여 더 거리가 짧은 점을 목표점으로 삼음.

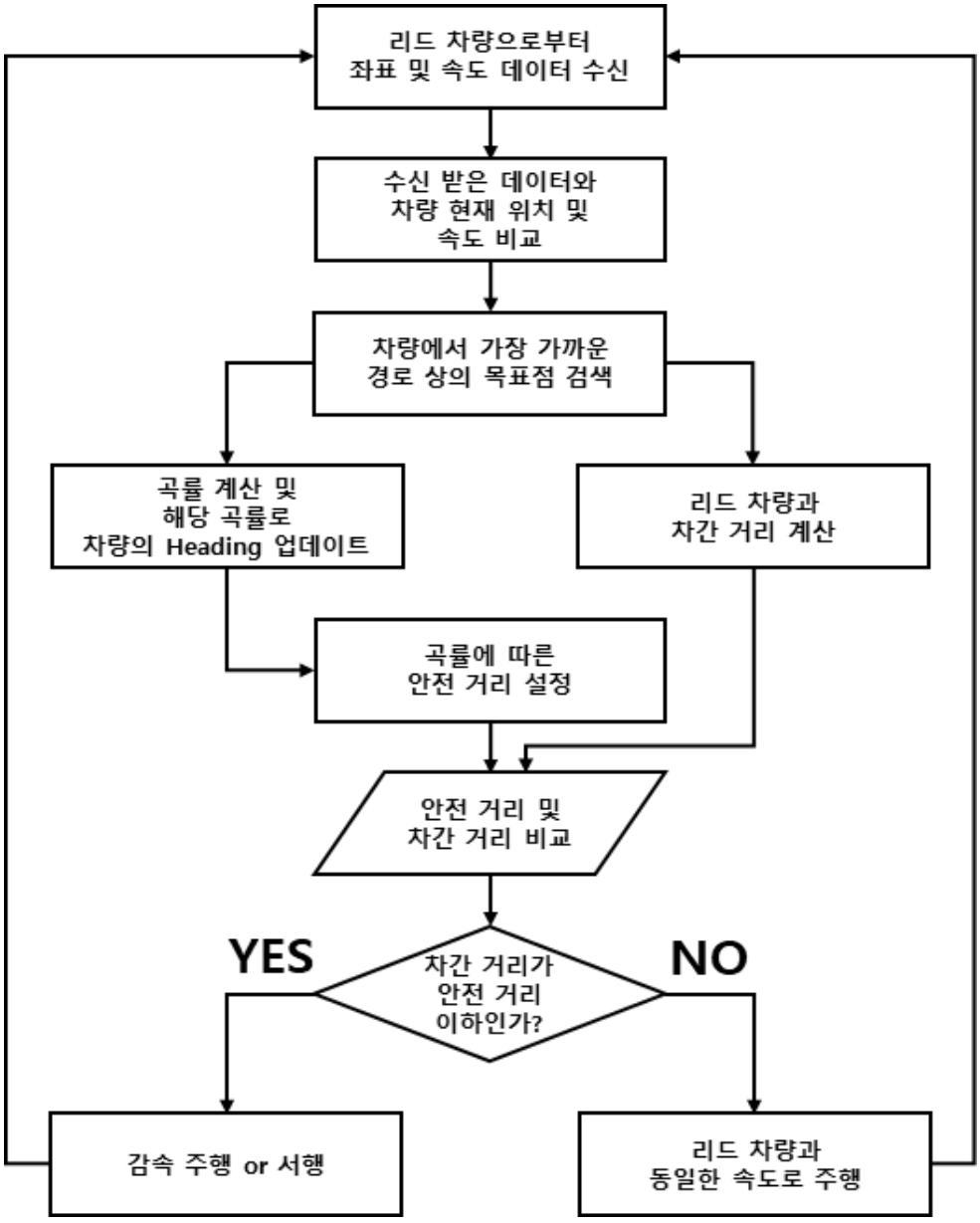
④ 각 차량은 pure pursuit 알고리즘을 이용하여 곡률을 계산하고 해당 곡률로 차량의 heading을 업데이트함. 또한 선행 차량과 경로상의 차간 거리를 계산함.

⑤ 각 차량은 곡률에 따라서 안전거리를 설정함. 곡률이 존재하는 경우 2m, 곡률이 존재하지 않는 경우 16m임.

⑥ 각 차량은 선행 차량의 속도와 각 차량의 속도 및 거리를 비교하여 충돌 시간(TTC, Time to Collision)을 계산함.

⑦ TTC가 발생했을 때, 안전거리보다 차간 거리가 이하일 경우에 각 차량의 속도를 낮춰 차간 거리를 늘리고 그렇지 않는 경우에 선행 차량의 속도로 주행함.

⑧ 시뮬레이션이 종료될 때까지 위 과정을 전송주기마다 반복함.



[경로 추종 알고리즘 순서도]

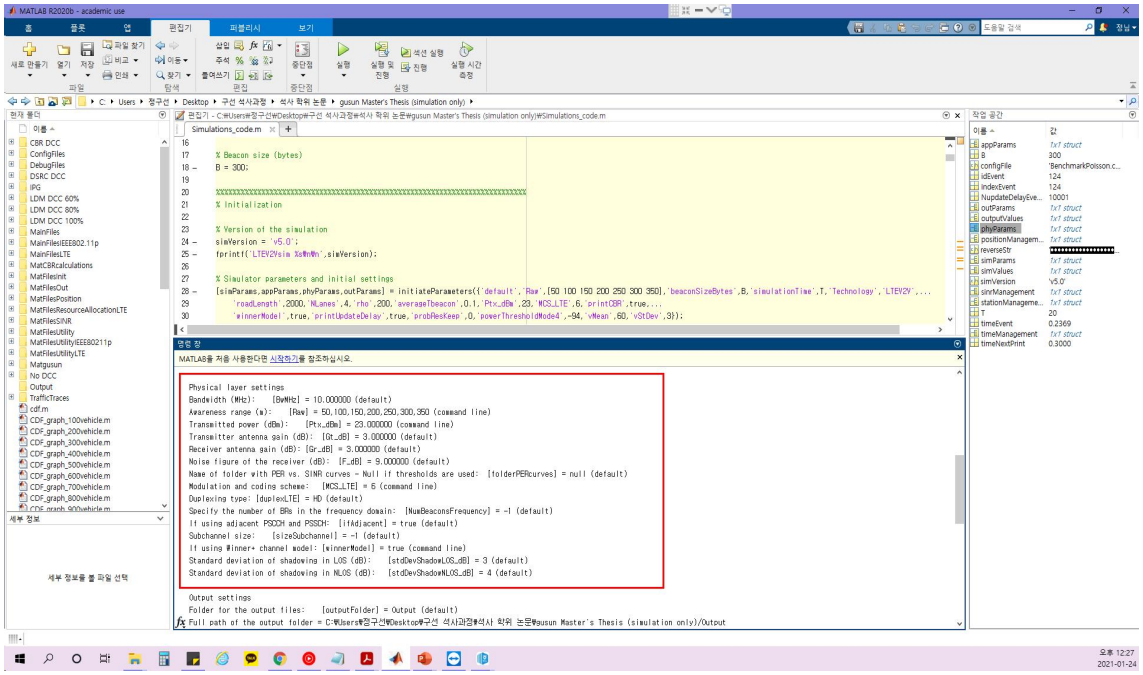
(라)-② 협력자율주행 트래픽 시뮬레이터와 cross-layer 시뮬레이터 통합

(라)-②-1. 협력자율주행 시뮬레이션을 위한 가상환경 구축PHY&MAC cross-layer 시뮬레이터 구현

○ Release 14에서 LTE 기반 C-V2X(Cellular V2X) Mode 4를 Matlab으로 구현함.

○ PHY layer 시뮬레이터

- 무선자원을 이루는 서브채널은 2가지 방법으로 서브채널화가 가능하며, 다음과 같음[8].
  - ✓ PSCCH와 PSSCH 인접한 경우: 전송 블록(TB)와 SCI는 인접한 자원 블록(RB)에서 전송됨. PSCCH SCI는 항상 서브채널의 맨 위 두 개의 자원 블록(RB)을 차지함. PSSCH TB는 서브채널을 이루는 나머지 자원 블록(RB)을 모두 차지함. 만약 PSSCH TB가 한 개의 서브채널을 초과해서 전송 블록(RB)을 차지한다면, 인접한 서브채널의 PSCCH SCI는 기회를 박탈당함.
  - ✓ PSCCH와 PSSCH 비인접한 경우: 서브채널은 오직 PSSCH TB만 사용함. PSCCH SCI는 채널의 맨 끝부분에 그룹화되며, PSSCH TB와 인접할 수 없음. 이 구성은 무선자원 당 패킷을 전송하려는 차량 단말의 수가 적은 경우, 공간적으로 비효율적임.
- 시뮬레이션에는 더 효율적인 PSCCH와 PSSCH가 인접한 경우를 가정하였음.
- 경로 손실은 3GPP에서 제안한 WINNER Ⅱ의 시나리오 B1을 사용하여 모델링하였음. 여기서 LOS(Line of Sight)에서 3dB 분산과 25m의 decorrelation distance를 가지는 shadowing을 가정함[22].



[PHY layer 시뮬레이터 동작 상황]

○ MAC layer 시뮬레이터 – 자원 할당 관리

- C-V2X에는 Mode 3과 Mode 4가 있으며, 각각 다음과 같이 설명됨.
  - ✓ Mode 3은 셀룰러 네트워크가 차량 단말이 V2V 직접 통신을 위해 사용하는 무선자원을 선택하고 관리함.
  - ✓ Mode 4는 차량 단말이 셀룰러 네트워크의 지원없이 독자적으로 무선자원을 선택하고 관리함.
- 시뮬레이션에는 궁극적으로 C-V2X 통신을 위한 기본인 C-V2X Mode 4를 가정함.
- C-V2X Mode 4는 셀룰러 네트워크의 지원 없이 작동할 수 있도록, 각 차량 단말은 SB-SPS(Sensing Based

Semi-Persistent Scheduling) 기법을 통해 무선자원을 자율적으로 선택하도록 함[27][28].

- SB-SPS 기법을 시뮬레이터에서 구현하였으며, SB-SPS는 다음과 같이 설명됨.

① 차량 단말은 설정된 전송주기마다 동일한 서브프레임에서 메시지를 전송함. 메시지를 전송할 때마다 RC(Re-selection Counter)에서 1씩 감소시킴.차량 단말은 지속적으로 서브프레임을 모니터링하고 RSSI(Reeceived Signal Strength Indicator) 및 RSRP(Reference Signal Received Power)를 측정함. RC는 0일 때, 차량 단말은 새로운 무선자원을 재 선택해야함. 이를 위해 지난 1,000ms의 센싱 윈도우 내의 모든 무선자원들을 고려함.

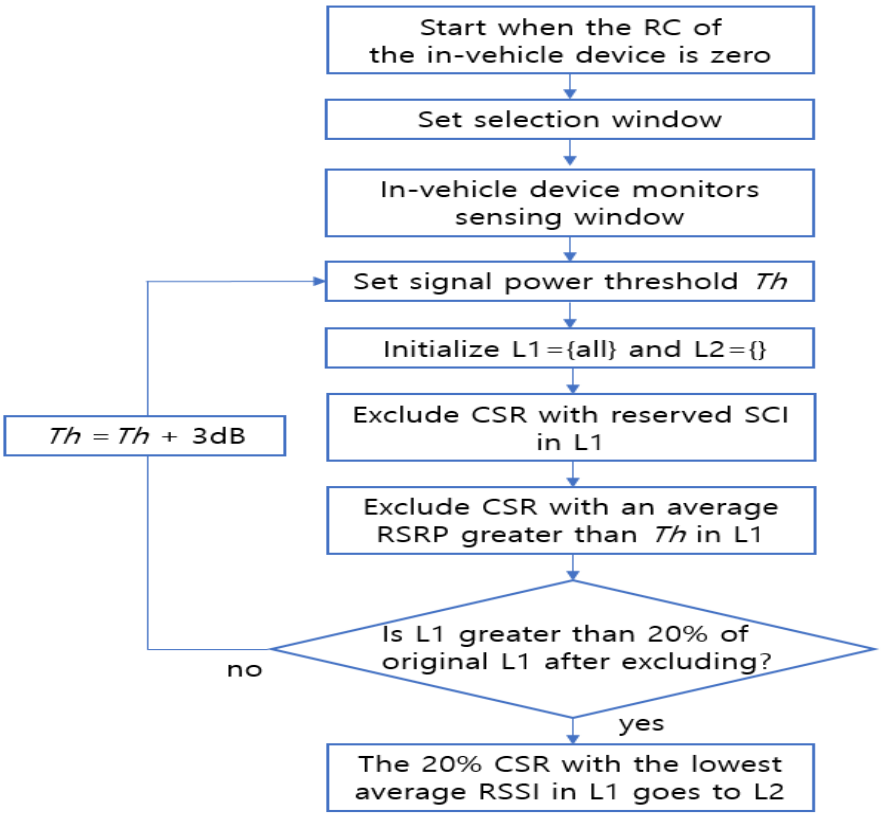
② 차량 단말의 신호전력 임계값을 설정하고, 셀렉션 윈도우 내 모든 CSR을 L1으로 설정하며, L2는 빈 공간으로 설정함. RC가 0이 되는 서브프레임 T부터 전송주기만큼 셀렉션 윈도우가 되며, 그 안에 있는 무선자원은 모두 CSR(Candidate single Sub-frame Resource)이 됨.

③ L1 내 CSR 중에서 예약된 CSR이거나, 평균 RSRP 측정값이 임계값보다 높은 CSR은 제외됨.

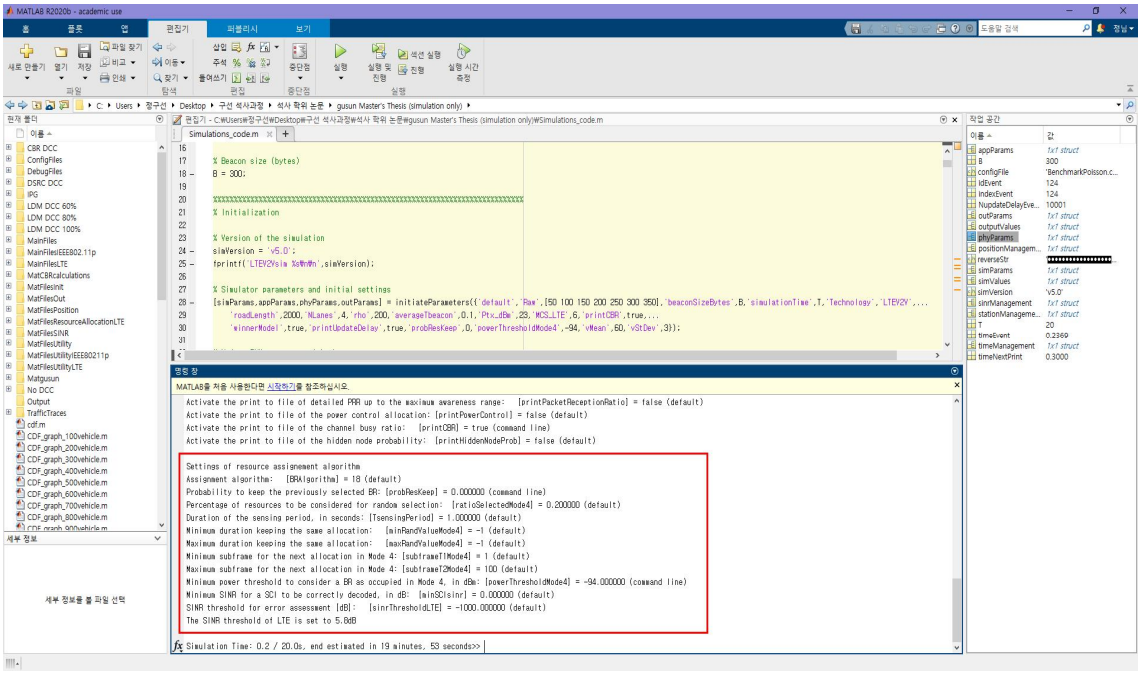
④ 1 내 남은 CSR이 처음 설정된 L1 내 CSR의 20% 미만이면, 임계값을 3dB 증가하고 제외과정을 반복함.

⑤ 20% 이상을 만족하면, 제외되고 남은 L1 내에서 평균 RSSI가 가장 작은 CSR의 20%는 L2로 이동됨.

⑥ 차량 단말은 이어지는 첫 번째 전송을 위해 L2의 무선자원 중 하나를 임의로 선택하여 메시지를 전송함. 그리고 차량 단말에 RC를 5~15 사이 값 중에 하나를 임의로 선택함.



[SB-SPS 기법의 절차]



[MAC layer 시뮬레이터 동작 상황]

○ MAC layer 시뮬레이터 - 분산혼잡제어

- 메시지를 전송하려는 차량 단말의 밀도가 증가할 경우, 여러 차량 단말들이 주파수 및 시간 축에서 동일한 무선자원을 사용하여 패킷을 전송해서 패킷 충돌이 발생함.
- 이로 인해 심각한 패킷 손실을 유발하고 차량 안전 서비스의 안정성에 중대한 영향을 미치게 됨.
- 이러한 단점을 보완하여 안정적인 V2X 통신을 보장하기 위해, 각 차량 단말이 전송주기, 전송전력 그리고 MCS(Modulation Coding Scheme) 등을 조절하여 패킷 충돌을 완화하는 분산혼잡제어가 C-V2X에서 제안됨.
- 기존에 제안된 CBR(Channel Busy Ratio) 기반 분산혼잡제어 및 신규 LDM(Local Dynamic Map) 기반 분산혼잡제어를 통한 전송주기 제어를 구현하였음.

(라)-②-2. 협력자율주행 트래픽 시뮬레이터와 cross-layer 시뮬레이터 통합

○ cross-layer 시뮬레이터 시뮬레이션 환경

- 도로 길이는 2km이며, 편도 4차로, 즉 총 8차로의 직선 고속도로임.
- 이동하는 차량 속도는 평균 60km/h, 표준편차 3km/h로 구성됨.
- 차량 밀도는 200대(1km 한 차로 당 13대), 400대(1km 한 차로 당 25대), 600대(1km 한 차로 당 38대), 800대(1km 한 차로 당 50대), 1000대(1km 한 차로 당 63대)로 가정함.
- 나머지 매개변수는 다음 표와 같음.

통신 기술	3GPP LTE C-V2X Mode 4
시뮬레이션 시간	40초
PSSCH-PSCCH 인접 여부	인접
채널 대역폭	10MHz
메시지 크기	300bytes
메시지 전송주기(TTI)	100ms (default)
전송전력	23dBm
SB-SPS 임계값	-94dBm
채널 모델	WINNER II, Scenario B1
MCS index	6 (=QPSK, 1/2)
서브프레임 당 서브채널 수	2개
잡음 지수	9dB
안테나 이득(송신, 수신)	3dB

[cross-layer 시뮬레이터 매개변수]

○ 협력자율주행 트래픽 시뮬레이터 시뮬레이션 환경

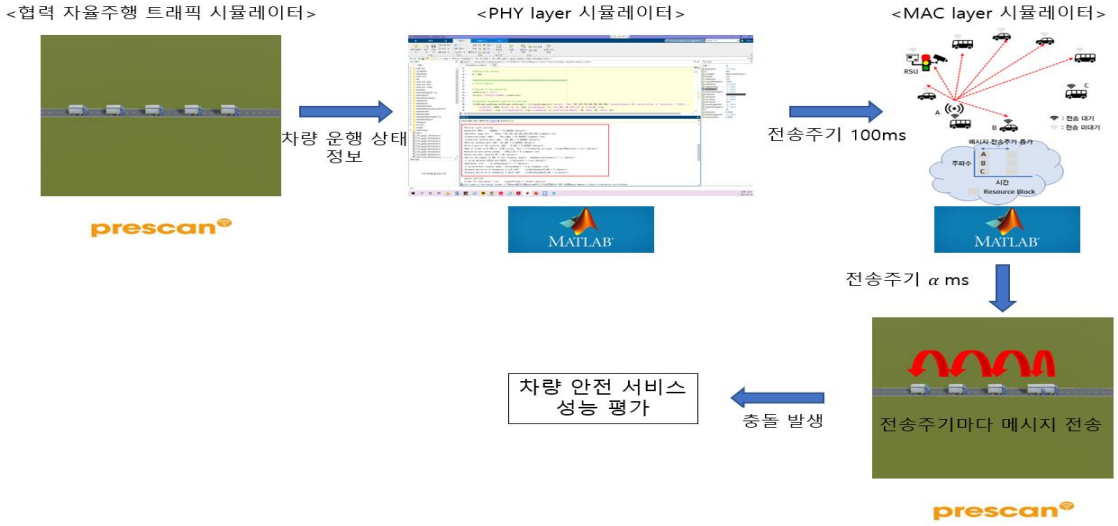
- 도로 길이, 차로 수, 차량 속도는 cross-layer 시뮬레이터와 동일함.
- 또한 V2V 통신은 C-V2X Mode 4를 사용하며, cross-layer 시뮬레이터와 동일하게 적용됨.
- 군집자율주행 차량 5대를 가정하며, 선두 차량을 따라오는 후행 차량들이 메시지를 받지 않는 상황에서는 앞에 차량이 없다고 판단해서 속도를 증가시키는 시나리오를 가정함.

○ 협력자율주행 트래픽 시뮬레이터와 cross-layer 시뮬레이터 통합의 시뮬레이션 동작 과정

- 협력자율주행 트래픽 시뮬레이터의 5대 군집자율주행 차량들은 cross-layer 시뮬레이터의 V2V 정보를 받아서 송신한 메시지가 성공하는지 실패하는지 결정됨.
- cross-layer 시뮬레이터의 차량 밀도에 협력자율주행 트래픽 시뮬레이터의 5대 군집자율주행 차량들이 포함되어 통합 시뮬레이터가 동작함.
- 통합 시뮬레이터의 동작 과정은 다음과 같이 설명됨.
  ① 협력자율주행 트래픽 시뮬레이터와 cross-layer 시뮬레이터는 시간 동기가 동일하게 맞춰지며, 동시에 동작함.
  ② 협력자율주행 트래픽 시뮬레이터의 5대 군집자율주행 차량들은 cross-layer 시뮬레이터의 차량 밀도에 포함되어 PHY와 MAC 계층에 따라 자원 할당 관리를 수행함.
  ③ 만약 차량 밀도가 혼잡하여 MAC 계층의 분산혼잡제어에 의해 전송주기가 제어가 조절되면, 제어된 전송주기

에 따라 군집자율주행 차량들은 메시지 전송을 수행함.

④ 마지막으로 전송주기마다 5대의 군집자율주행 차량들의 메시지 수신 성공 여부와 차량 충돌 여부를 통해 차량 안전 서비스 성능을 평가함.



[통합 시뮬레이터 흐름도]

(마) 협력자율주행 통합 시뮬레이션 플랫폼 기반 신규 기술 시험 및 최적화

(마)-① 기존 분산혼잡제어 기술

(마)-①-1. 협력자율주행 시뮬레이션을 위한 가상환경 구축

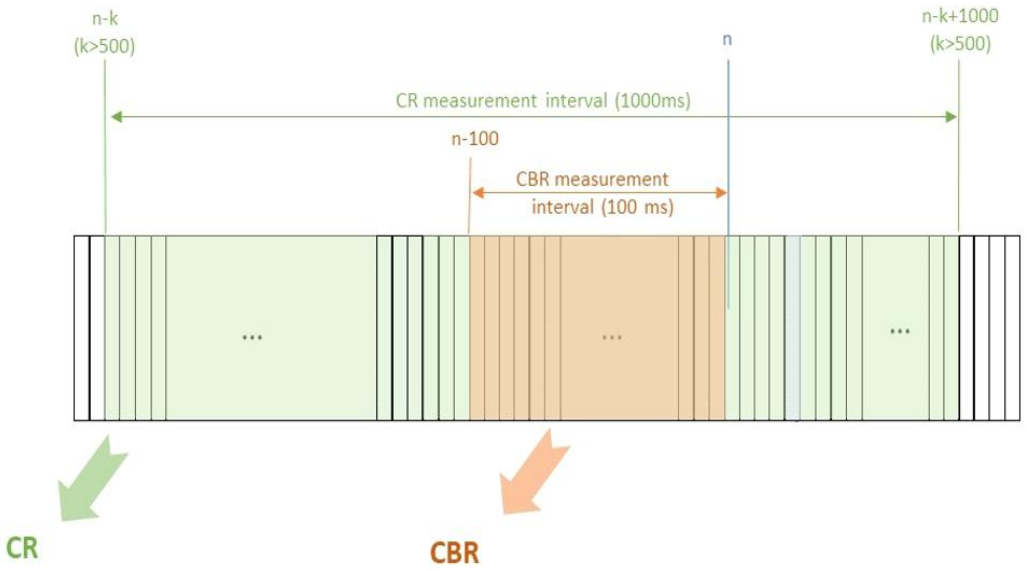
○ CBR(Channel Busy Ratio) 기반 분산혼잡제어 기술은 각 차량 단말에서 채널 혼잡도를 나타내는 CBR을 측정함.

○ 이에 따라 각 차량 단말의 CR(Channel-occupancy Ratio)의 최대값인 CRlimit을 결정함.

○ CRlimit에 맞춰서 각 차량 단말의 메시지 전송주기를 제어함.

○ CBR과 CR은 다음과 같이 계산됨[8].

- CBR 측정은 서브프레임 n에서 수행되며, 아래 그림과 같이 서브프레임 n에서 측정된 CBR(n)은 [n-100:n-1]의 서브프레임에서 미리 정의된 전력 임계값보다 높은 평균 RSSI(Received Signal Strength Indicator)를 가진 서브채널의 수로 정의됨.
- CR 측정은 서브프레임 n에서 수행되며, [n-a:n-1]의 서브프레임에서 전송을 위해 사용된 서브채널의 수와 [n:n+b]의 서브프레임에서 전송을 위해 사용하기로 예정된 서브채널의 수의 총 합을 [n-a:n+b] 내 서브채널의 총 수로 나눈 것으로 주어짐.



[전송주기가 100ms일 때, CBR과 CR 계산 개념[8]]

○ 3GPP는 CBR 간격을 최대 16개 간격으로 나눌 수 있다고 규정하였으며, CBR 값의 각 간격에 대해 CRlimit은 차량 단말의 최대 CR 값임.

○ 차량 단말이 메시지 전송을 할 때, CBR 값을 적절한 해당 간격으로 맵핑하여 해당 CRlimit을 얻음.

○ CR 값이 CRlimit보다 높으면 차량 단말은 CRlimit이하로 CR 값을 줄여야 함.

○ 3GPP TSG RAN1 기술문서[11]에서는 패킷 드롭, 즉 전송주기 제어를 수행했으므로 CR 값에 따라 전송주기 제어를 수행함.

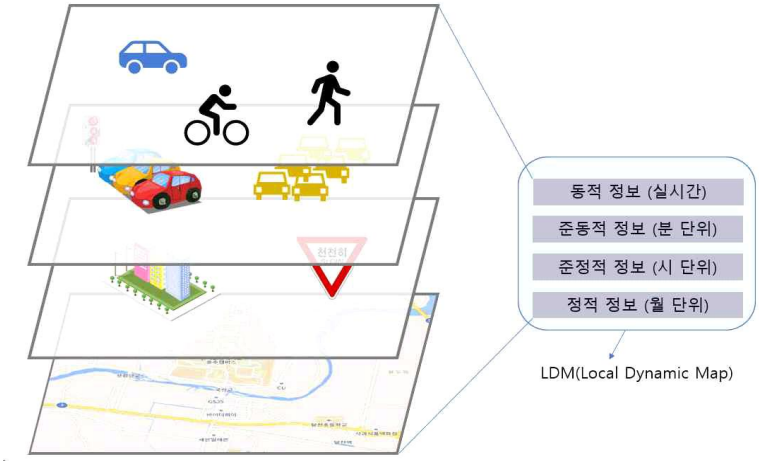
CBR measured	CRlimit	전송주기
CBR ≤ 0.650	no limit	100ms
0.650 < CBR ≤0.675	1.6e-3	334ms
0.675 < CBR ≤0.700	1.5e-3	334ms
0.700 < CBR ≤0.725	1.4e-3	500ms
0.725 < CBR ≤0.750	1.3e-3	500ms
0.750 < CBR ≤0.800	1.2e-3	500ms
0.800 < CBR ≤0.825	1.1e-3	500ms
0.825 < CBR ≤0.850	1.0e-3	500ms
0.850 < CBR ≤0.875	0.9e-3	1,000ms
0.875 < CBR	0.8e-3	1,000ms

[MCS가 6일 때, CBR에 따른 전송주기]

(마)-② 신규 분산혼잡제어 기술

○ LDM(Local Dynamic Map) 개념

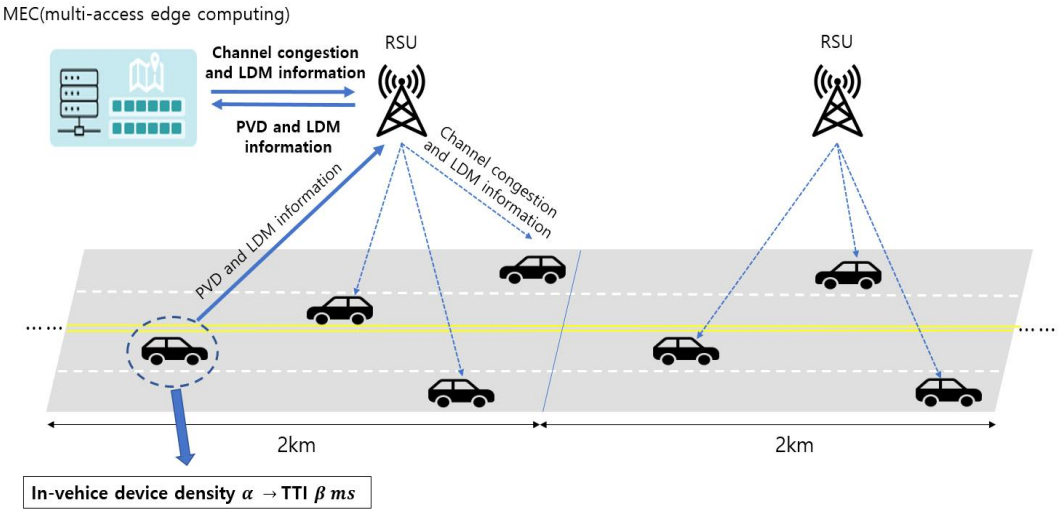
- LDM은 C-ITS(Cooperative-Intelligent Transport System) 기술 개발을 위해 ITS 기지국 간에 교환되는 방대한 양의 데이터를 신속하고 정확하게 처리하기 위해 유럽에서 제안된 기술이며, ISO(International Organization for Standardization)와 ETSI(European Telecommunications Standards Institute)에서 개념 표준이 제정된 상태임[30].
- LDM 표준에서는 주변 차량, 보행자, 도로시설물, 이벤트 등의 차량 주행 환경을 LDM 객체로 정의하며, 정확도 높은 시공간 정보를 갖도록 요구함[30].
- LDM의 각 계층 정보는 월 단위로 변화 또는 업데이트되는 정적 계층, 시간 단위로 변화 또는 업데이트되는 준정적 계층, 분 단위로 변화 또는 업데이트되는 준동적 계층 그리고 초 단위로 변화 또는 업데이트되는 동적 계층을 포함함.
- 특히, 동적 계층에는 서비스 영역 내에 이동하는 차량 및 보행자 등의 위치, 이동방향 그리고 속도 등의 이동 궤적 정보가 포함됨.
- 이를 위해 차량이 본인의 이동 상태 정보를 포함하는 PVD(Probe Vehicle Data) 메시지를 주기적으로 V2X 노변기지국(Road Side Unit, RSU)에 전송하고, MEC(Multi-access Edge Computing)에서 이를 이용하여 LDM의 동적 계층에 차량 및 보행자 등의 위치, 이동방향 그리고 속도 등의 정보를 포함시킴.



〈LDM 개념〉

○ LDM 기반 분산혼잡제어 기술의 개념

- MEC에서 LDM의 동적 계층 정보를 이용하면 RSU 반경 1km 이내의 V2X 통신 채널 별 차량 단말의 밀도를 추정할 수 있음.
- RSU가 기존 RSA(Road Side Alert) 메시지에 V2X 통신 채널 별 차량 단말의 밀도를 기반으로 한 채널 혼잡 정보를 포함하여 주변 차량 단말들에게 주기적으로 브로드캐스팅할 수 있음.
- 각 차량 단말들은 수신된 RSA 메시지의 채널 혼잡 정보를 이용하여 주변 차량 단말의 밀도를 추정하고 이를 이용하여 메시지의 전송주기를 조절할 수 있음.



[LDM 기반 분산혼잡제어 개념]

(마)-③ 3GPP LTE C-V2X R.14에서 신규 분산혼잡제어 기술의 전송주기 최적화

○ 3GPP LTE C-V2X R.14에서는 메시지 최소 전송 주기를 100ms로 제한하고, 혼잡도에 따라 최대 1s까지 전송주기를 조절할 수 있음.

○ CBR 기반 분산혼잡제어 기술에서 CBR은 무선채널의 주파수와 시간 선택적 페이딩의 영향을 받는 RSSI를 이용하여 추정되기 때문에, CBR을 이용하여 경쟁하는 차량 단말의 수를 정확하게 추정하는 것은 힘듬.

○ 반면, LDM 기반 분산혼잡제어 기술에서 LDM의 동적 계층은 각 차량 단말에서 측정된 위치 및 이동 상태 정보에 기반하여 100ms 단위로 업데이트되기 때문에, 이를 기반으로 각 차량 단말이 접속하려는 V2X 통신 채널과 위치 정보를 이용하여 V2X 통신 채널 별로 경쟁하는 차량 단말의 수르 정확하게 추정할 수 있음.

○ 따라서 LDM에 기반하여 전송주기를 결정할 경우, CBR 기반 전송주기를 결정하는 기술보다 우수한 성능을 제공할 수 있음.

○ LDM 기반 분산혼잡제어 기술의 전송주기 최적화를 위해 기존 기술과 신규 기술의 성능을 PDR(Packet Delivery Ratio)과 IPG(Inter-Packet Gap) 관점에서 분석하였으며, 200, 400, 600, 800, 1000대의 차량 밀도 환경에서 수행함.

○ PDR과 IPG는 다음과 같이 설명됨.

- PDR은 주어진 통신 거리에서 모든 차량 단말 사이에 전송한 메시지 중에서 오류 없이 전송된 메시지의 비율임[26].
- IPG는 동일한 송신 차량 단말과 수신 차량 단말 사이에서 연속적으로 오류 없이 수신된 2개의 메시지 사이 시간 간격임[26].

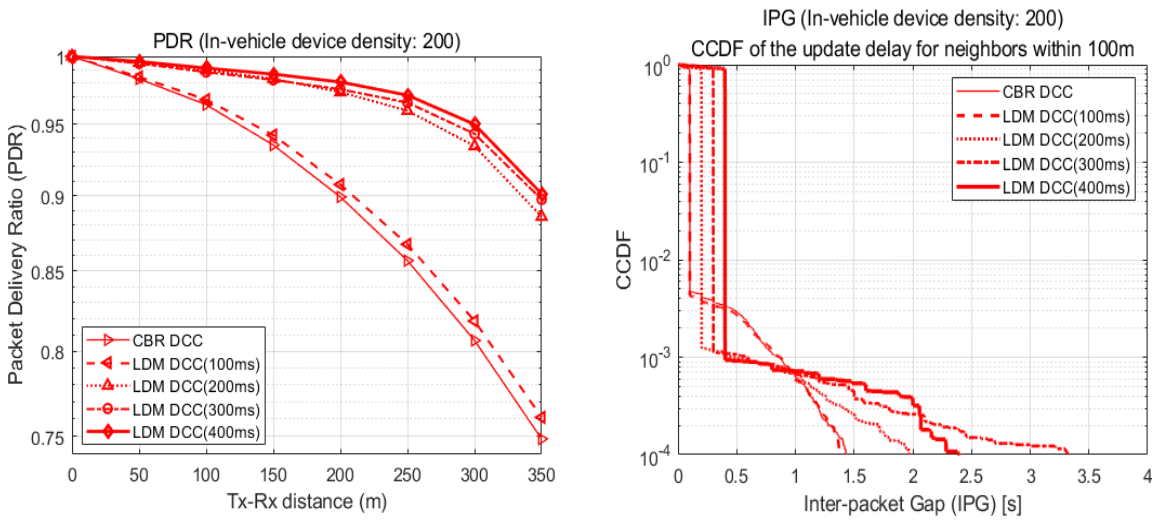
○ 다음 그래프는 차량 단말 밀도가 200대와 1000대일 경우, LDM 기반 분산혼잡제어와 CBR 기반 분산혼잡제어의 PDR과 IPG 성능 결과를 비교하여 보여줌.

○ PDR 성능 그래프는 차량 단말 송수신기 거리에 따른 PDR을 보여주며, IPG CCDF(Complementary Cumulative Distribution Function) 성능 그래프는 주어진 통신거리, 즉 100m 이내의 송수신기 사이에서 오류 없이 메시지를 성공적으로 보낸 시간 간격을 나타냄.

○ 차량 단말 밀도에 따른 성능 분석

- 200대 PDR과 IPG 성능 분석 (3GPP LTE C-V2X(Release 14))
  - ✓ LDM DCC(100ms)와 LDM DCC(200, 300, 400ms) 사이에 최대 15%의 PDR 성능 차이를 나타냄.
  - ✓ MCS가 6일 경우, 1ms 당 2개의 서브채널을 통해 2개의 무선자원을 구성함. 따라서 LDM DCC(100ms)에서 무선자원의 개수와 차량 단말 밀도는 같이 때문에 메시지가 충돌할 확률이 상대적으로 크며, PDR 성능이 상대적으로 낮음.
  - ✓ 반면, LDM DCC(200, 300, 400ms)에서 무선자원의 개수는 차량 단말 밀도보다 크기 때문에 메시지가 충돌할 확률이 적으며, LDM DCC(200, 300, 400ms)사이에 PDR 성능 차이가 미세함.
  - ✓ CBR DCC는 평균 전송주기가 100ms이므로 LDM DCC(100ms)와 PDR 성능이 유사함.
  - ✓ IPG CCDF 성능 그래프를 보면, y축 아래 부분에서 서로 교차됨을 확인할 수 있음. 자세히 보면, 대체적으로 CCDF가 10-2, 즉 시뮬레이션 시간동안 전제 전송 지연 분포의 99%는 전송주기와 동일한 전송 지연을 가짐.
  - ✓ 서로 교차하는 부분인 1%미만의 높은 전송 지연 분포는 포용할 수 있는 부분임.
  - ✓ 정리해보면, CBR 기반 분산혼잡제어와 100ms의 LDM 기반 분산혼잡제어의 PDR 성능이 비슷함을 알 수 있음. 또한 IPG 성능도 비슷함을 알 수 있음.

✓ 따라서 200대의 상황에서 LDM 기반 분산혼잡제어의 최적 전송주기는 100ms임.



[차량 단말 밀도 200대 환경에서 PDR과 IPG 성능 (3GPP LTE C-V2X(Release 14))]

- 1000대 PDR과 IPG 성능 분석 (3GPP LTE C-V2X(Release 14))

✓ LDM DCC(100ms)와 LDM DCC(200, 300, 400ms) 사이에 최대 45%의 PDR 성능 차이를 나타냄.

✓ LDM DCC(200, 300, 400ms)에서 무선자원의 개수는 차량 단말 밀도보다 작기 때문에 메시지가 충돌할 확률이 존재함. LDM DCC(100ms)에서는 패킷 손실에 특히 더 치명적이며, LDM DCC(200, 300, 400ms)에서 패킷 충돌은 점차 줄어들지만, 여전히 발생하기 때문에 서로 PDR 성능 차이가 남.

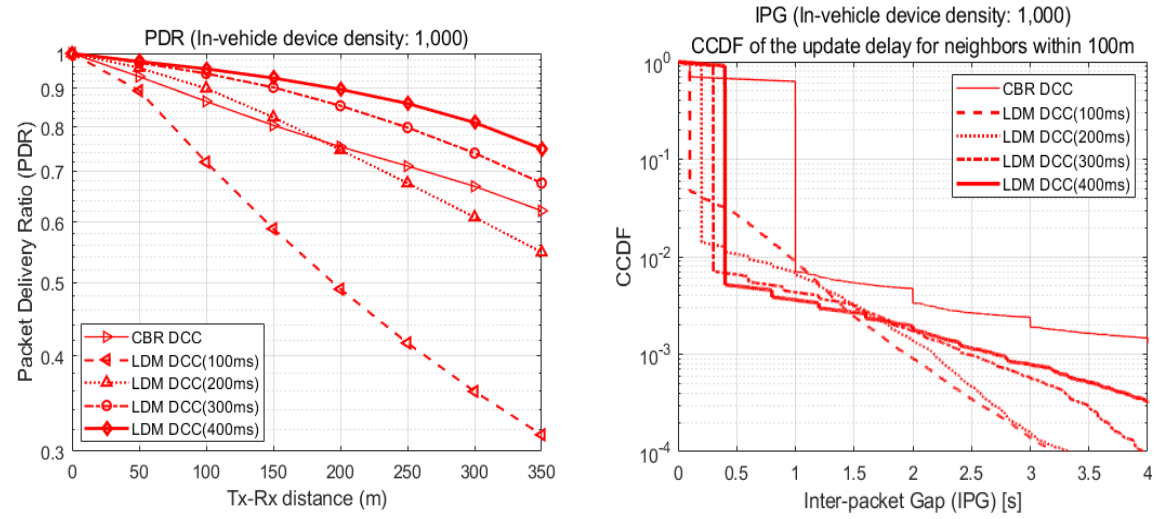
✓ CBR DCC는 평균 전송주기가 1000ms이지만, LDM DCC(300ms)보다 PDR 성능이 떨어지며 LDM DCC(200ms)보다 짧은 송수신기 거리에서 PDR 성능이 떨어짐을 확인할 수 있음.

✓ 이를 통해 동일한 차량 단말 밀도에서 전송주기가 증가함에 따라 메시지가 충돌할 확률이 줄어들지만, 너무 높은 전송주기는 패킷 손실과 같은 성능 열화를 가져옴을 확인할 수 있음.

✓ 정리해보면, 고밀도 환경(차량 단말 밀도 1000대)에서는 PDR 90%를 만족시킬 수 있는 송수신기간 거리가 CBR DCC는 73m이며, 200ms 전송주기를 가지는 LDM DCC는 100m로 증가함.

✓ 90%의 IPG는 CBR DCC는 1000ms이며, 200ms 전송주기를 가지는 LDM DCC는 200ms로 획기적으로 감소함.

✓ 따라서 고밀도 환경에서 LDM DCC(200ms)가 IPG를 감소시키면서, 동시에 PDR 성능을 개선함을 확인할 수 있음.



[차량 단말 밀도 1000대 환경에서 PDR과 IPG 성능 (3GPP LTE C-V2X(Release 14))]

○ 다양한 차량 단말 밀도 환경에서의 성능 분석을 위해 CBR 기반 분산혼잡제어와 LDM 기반 분산혼잡제어에서 최적의 전송주기를 사용할 경우, PDR과 IPG 성능을 분석하였으며 다음 표와 같음.

○ *은 CBR 기반 분산혼잡제어와 비교하여 증가 또는 감소량임.

○ PDR 기준을 90%와 95%로 한 이유는 C-ITS의 기본 도로안전 서비스에 대해 C-V2X의 신뢰성 기준이 90%이기 때문임[31].

○ CBR 기반 분산혼잡제어와 비교해 IPG, 즉 전송 지연을 최소화하면서 동시에 PDR을 보장하는 전송주기를 LDM 기반 분산혼잡제어의 최적 전송주기로 선택하였음.

○ 표를 정리하면 LDM 기반 분산혼잡제어는 차량 단말 밀도가 증가하더라도 200ms의 IPG를 보장하면서, CBR 기반 분산혼잡제어에 비해 동일 PDR을 보장하는 송수신기간 거리를 증가시킴을 확인할 수 있음.

○ 하지만 CBR 기반 분산혼잡제어는 차량 단말 밀도가 증가할 경우, IPG가 급격히 증가함과 동시에 PDR에서 성능이 열화됨을 확인할 수 있음.

○ LDM 기반 분산혼잡제어의 최적 전송주기에서 패킷 전송률 99.99%를 만족하는 송수신기 간 거리는 최대 17m임을 확인할 수 있음.

		PDR=0.9	PDR=0.95	PDR=0.9999	IPG=0.9	IPG=0.95
200대	CBR DCC	200m	124m	15m	100ms	100ms
	LDM DCC(100ms)	+10m*	+11m*	16m	+0ms*	+0ms*
400대	CBR DCC	141m	64m	6m	335ms	516ms
	LDM DCC(200ms)	+102m*	+92m*	17m	-135ms*	-316ms*
600대	CBR DCC	167m	83m	8m	500ms	500ms
	LDM DCC(200ms)	-2m*	+17m*	10m	-300ms*	-300ms*
800대	CBR DCC	94m	48m	4.5m	1,000ms	1,000ms
	LDM DCC(200ms)	+35m*	+27m*	8m	-800ms*	-800ms*
1,000대	CBR DCC	73m	37m	3.7m	1,000ms	1,000ms
	LDM DCC(200ms)	+27m*	+19m*	6m	-800ms*	-800ms*

[최적 전송주기의 LDM 기반 분산혼잡제어와 CBR 기반 분산혼잡제어의 성능 비교 (3GPP LTE C-V2X(Release 14))]

2km 내 차량 단말 밀도	CBR DCC 전송주기	LDM DCC 최적 전송주기
200대	100ms	100ms
400대	334ms	200ms
600대	500ms	200ms
800대	1,000ms	200ms
1,000대	1,000ms	200ms

[차량 단말 밀도에 따른 전송주기]

○ LDM의 동적 계층에 의해 추정된 차량 단말 혼잡도 정보를 이용하여, 각 차량 단말들이 해당 혼잡도에 따라 분산적으로 메시지의 전송주기를 조절하는 분산혼잡제어 기술을 제시함.

○ 그리고 PHY&MAC cross-layer 시뮬레이터를 통해, 차량 단말 혼잡도에 따른 LDM 기반 분산혼잡제어의 최적 메시지 전송주기를 도출함.

○ LDM 기반 분산혼잡제어 기술이 CBR 기반 분산혼잡제어 기술 대비 동일 PDR에서 전송 거리를 최대 102m 증가시키고 동일 IPG에서 패킷 간 시간 간격, 즉 전송 지연을 최대 800ms 감소시킬 수 있음을 확인함.

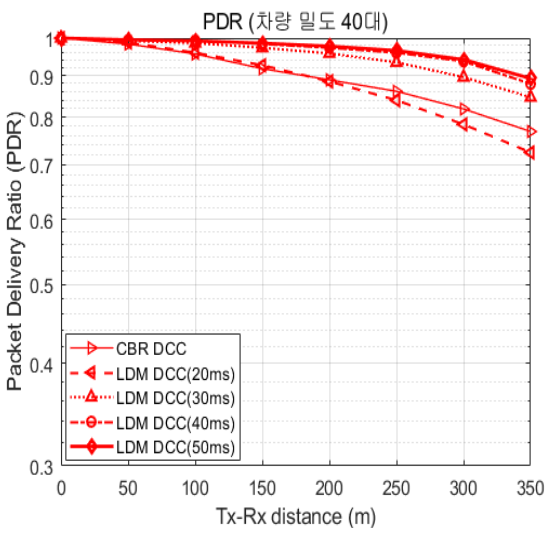
(마)-④ 3GPP LTE C-V2X R.15(eV2X)에서의 분산혼잡제어 성능 분석

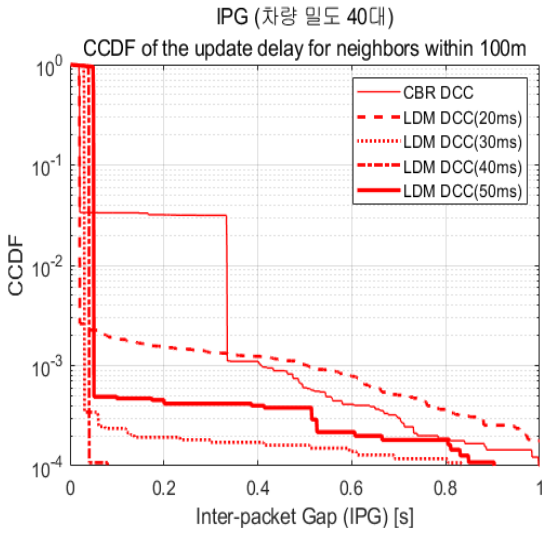
○ 3GPP LTE C-V2X R.15에서는 메시지 최소 전송 주기를 20ms로 하고, 혼잡도에 따라 최대 1s까지 전송주기를 조절할 수 있음. 따라서, LDM 정보를 이용하여 차량 혼잡도를 추정하고, 메시지 전송 주기를 20ms, 30ms, 40ms, 50ms로 조절하는 LDM DCC 기술을 제안하고 성능을 분석함.

○ 3GPP LTE C-V2X R.15의 패킷 성공률, 즉 신뢰성 요구사항인 99.99%를 만족하는 CBR DCC, LDM DCC 기술의 차량 밀도와 전송주기에 따른 송수신기 간 거리는 다음과 같음.

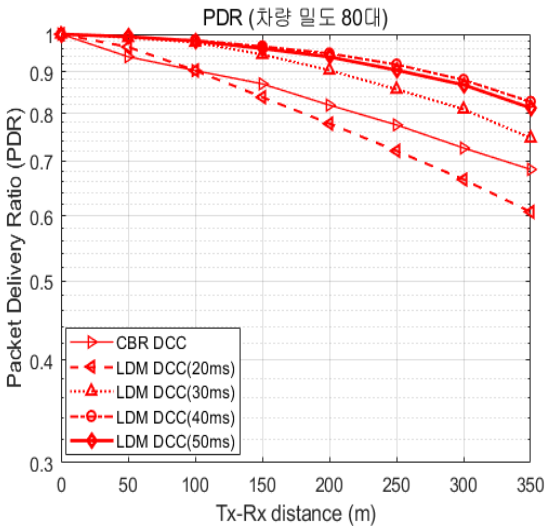
○ 또한 3GPP LTE C-V2X R.15에서 CBR DCC, LDM DCC 기술의 차량 밀도와 전송주기에 따른 delay 성능, 즉 시뮬레이션 시간동안 전송지연 시간 분포의 95%에 해당하는 전송지연(IPG)는 다음과 같음.

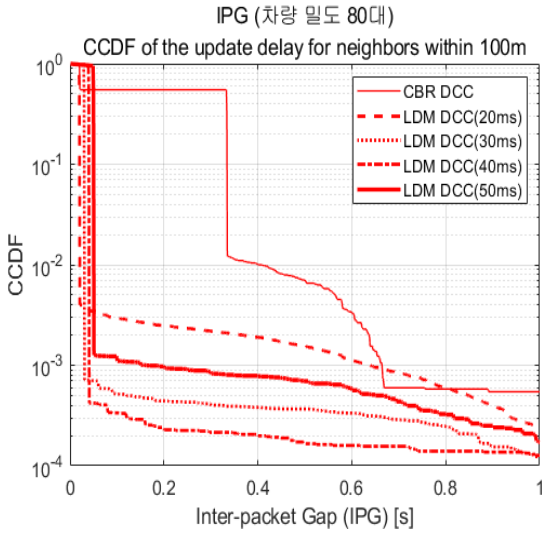
		패킷 성공률 99.99%를 만족하는 송수신기 거리	전송지연 시간 분포의 95%를 만족하는 IPG (ms)
40대	CBR DCC	18m	21ms
	LDM DCC(20ms)	24m	20ms
	LDM DCC(30ms)	38m	30ms
	LDM DCC(40ms)	48m	40ms
	LDM DCC(50ms)	60m	50ms
80대	CBR DCC	5m	334ms
	LDM DCC(20ms)	8m	20ms
	LDM DCC(30ms)	31m	30ms
	LDM DCC(40ms)	37m	40ms
	LDM DCC(50ms)	42m	50ms
120대	CBR DCC	3m	500ms
	LDM DCC(20ms)	6m	20ms
	LDM DCC(30ms)	16m	30ms
	LDM DCC(40ms)	36m	40ms
	LDM DCC(50ms)	42m	50ms
160대	CBR DCC	2m	1000ms
	LDM DCC(20ms)	4m	20ms
	LDM DCC(30ms)	10m	30ms
	LDM DCC(40ms)	27m	40ms
	LDM DCC(50ms)	27m	50ms
200대	CBR DCC	2m	1000ms
	LDM DCC(20ms)	2m	20ms
	LDM DCC(30ms)	6m	30ms
	LDM DCC(40ms)	15m	40ms
	LDM DCC(50ms)	15m	50ms



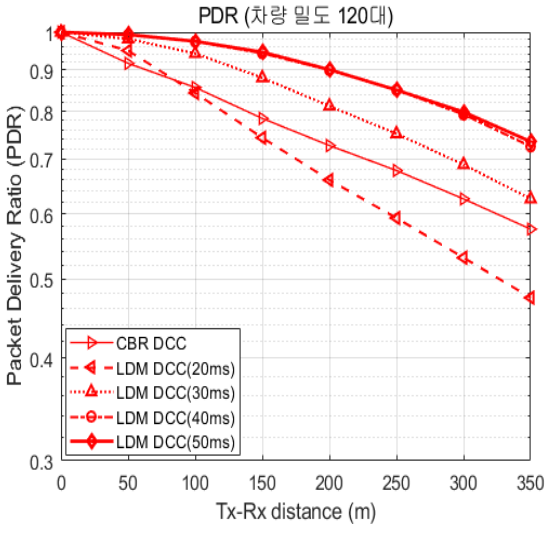


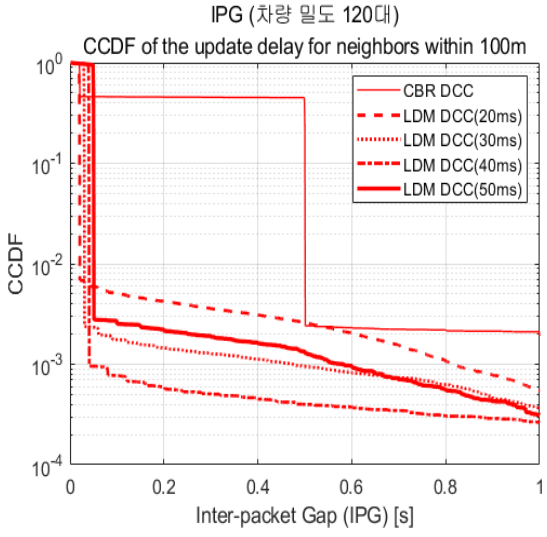
[차량 단말 밀도 40대 환경에서 PDR과 IPG 성능]



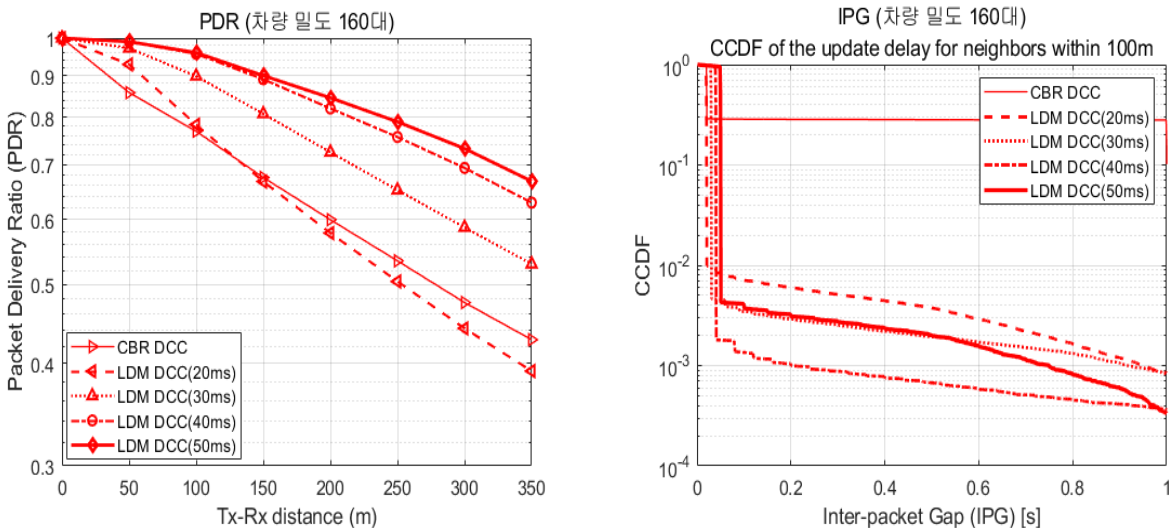


[차량 단말 밀도 80대 환경에서 PDR과 IPG 성능]

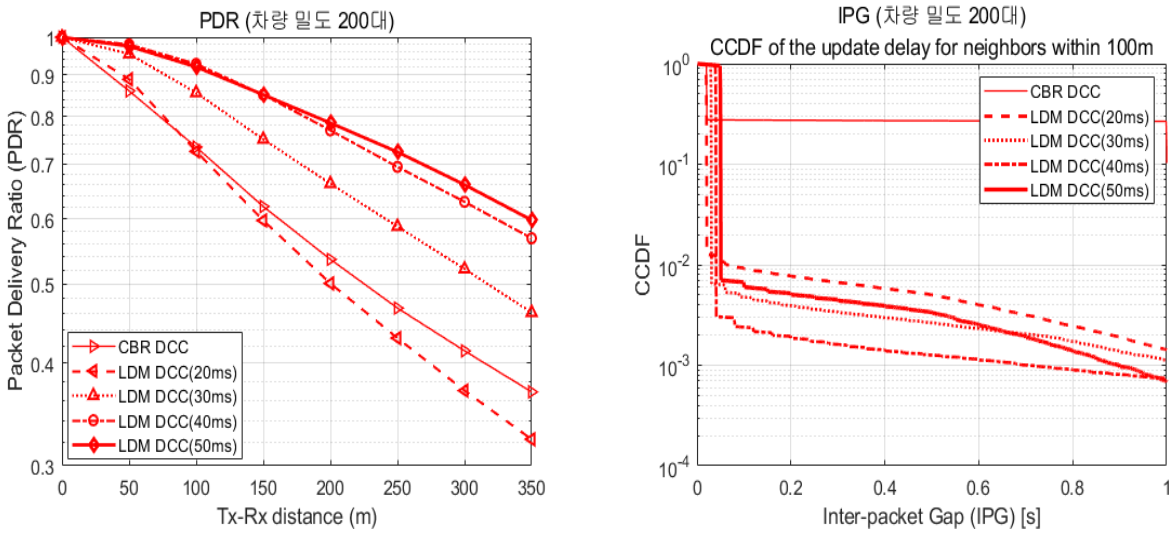




[차량 단말 밀도 120대 환경에서 PDR과 IPG 성능]



[차량 단말 밀도 160대 환경에서 PDR과 IPG 성능]



[차량 단말 밀도 200대 환경에서 PDR과 IPG 성능]

○ 3GPP LTE C-V2X R.15에서 CBR DCC와 비교하여 제안하는 LDM DCC(20, 30, 40 ,50ms)에서 PDR 99.99%를 만족하는 송수신기 간 거리가 더 큰 값을 가지면서, 동시에 전송지연은 더 적은 값을 가지는 LDM DCC의 전송주기를 최적 전송주기로 결정함.

○ 따라서 차량 밀도 40, 80, 120, 160, 그리고 200대에서 CBR DCC에 비해 성능이 뛰어난 LDM DCC의 최적 전송주기는 20ms임을 확인할 수 있음.

(바) 협력자율주행 통합 시뮬레이션 플랫폼 기반 신규 기술 성능 검증

(바)-① 협력자율주행 통합 시뮬레이션 플랫폼 환경

○ 통합 시뮬레이터 환경은 위에서 설명한 것과 동일하며, 다만 차량 밀도는 200대(1km 한 차선 당 13대), 400대(1km 한 차선 당 25대), 1000대(1km 한 차선 당 63대)에서 CBR 기반 분산혼잡제어 및 LDM 기반 분산혼잡제어 기반 군집자율주행 시나리오의 차량 안전 서비스 안정성을 평가함.

○ 협력자율주행 트래픽 시뮬레이터의 시뮬레이션 시간은 80초이며, cross-layer 시뮬레이터의 시뮬레이션 시간은 40초임.

○ 이를 자세히 설명하면, 협력자율주행 트래픽 시뮬레이터는 0~30초와 70~80초는 기본 전송주기인 100ms로 5대의 군집자율주행 차량들이 주행을 함.

○ 30~70초에서는 5대 군집자율주행 차량들의 이동 상태 정보가 cross-layer 시뮬레이터로 이동하여 자원 할당 관리 및 분산혼잡제어에 의한 조절된 전송주기를 받아서 V2V 통신을 이어나감.

○ 이를 통해 시뮬레이션 시간동안 조절된 전송주기에서 5대 군집자율주행 차량들의 차량 안전 서비스 안정성을 전송주기마다 평가함.

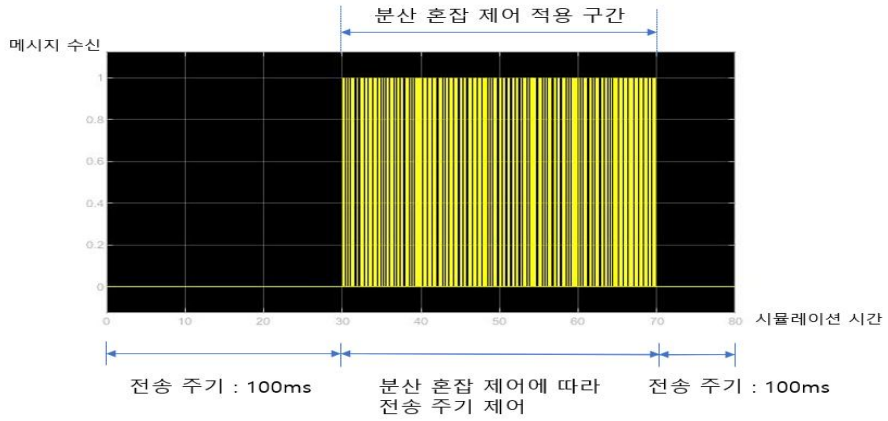
(바)-② 협력자율주행 통합 시뮬레이션 플랫폼 기반 신규 기술 성능 평가 항목

○ 안정성 평가에는 메시지 수신 그래프와 차량 충돌 그래프를 통해 차량 안전 서비스의 안정성을 평가하며, 군집자율주행 차량 간 충돌이 없다면 안정성 평가는 적합하다고 판단함.

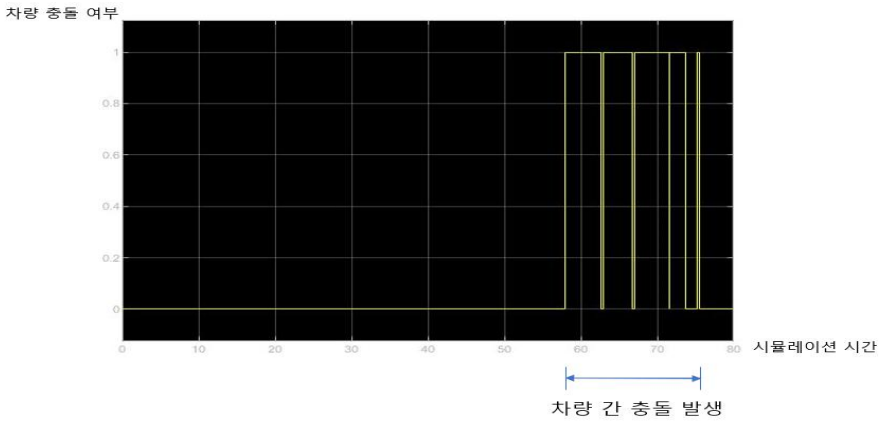
○ 군집자율주행 시나리오는 선두 차량과 뒤따라오는 후행 차량 사이 거리가 가깝기 때문에 메시지 수신 실패는 없다고 가정함.

○ 메시지 수신 그래프와 차량 충돌 그래프는 다음과 같이 설명됨.

- 메시지 수신 그래프에서 x축 값은 시뮬레이션 시간이며, y축 값은 메시지가 수신을 성공하면 1, 수신을 안 할 때는 0임.

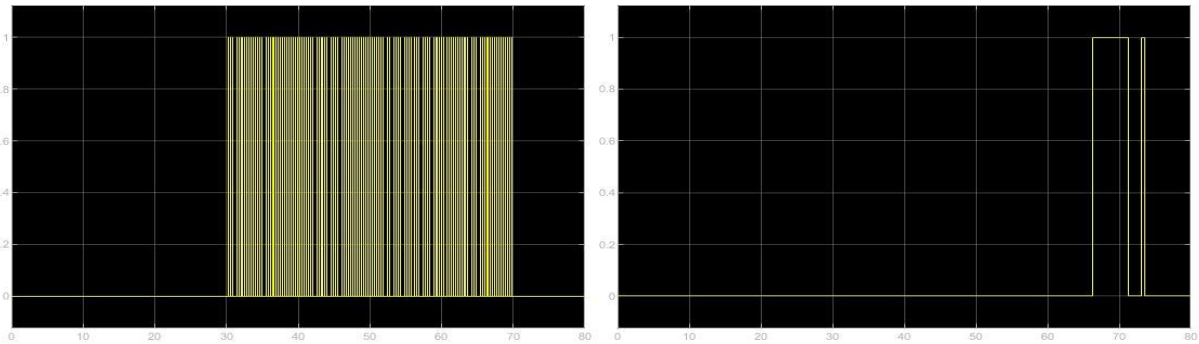


- 차량 충돌 그래프는 x축 값은 시뮬레이션 시간이며, y축 값은 5대의 차량 중에 충돌이 발생하면 1, 5대의 차량 중에 충돌이 아무도 없으면 0임.

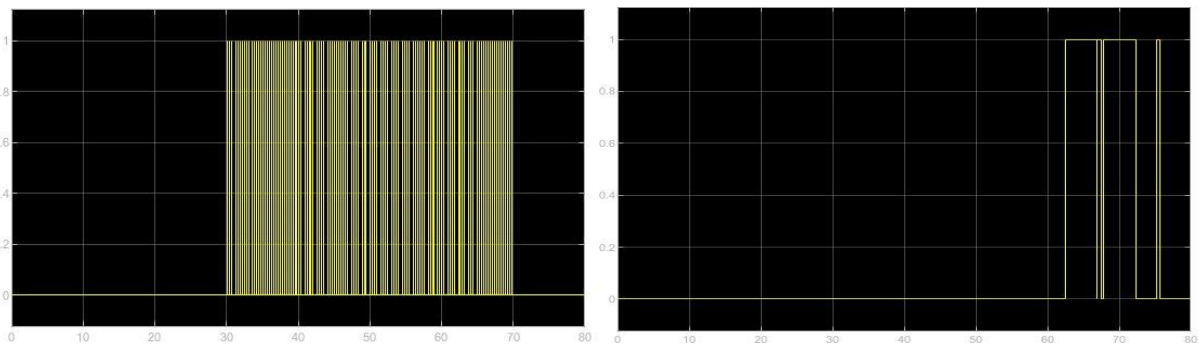


○ 다음 그래프들은 차량 단말 간 충돌이 발생한 상황, 즉 차량 안전 서비스 안정성에 적합하지 않은 시나리오 상황임.

- 200대 LDM DCC(300ms) 메시지 수신 그래프와 차량 충돌 그래프
  - ✓ 시뮬레이션 시간이 66초일 때, 군집자율주행 차량들 사이에 충돌이 발생한 것을 확인할 수 있음.
  - ✓ 차량 단말 밀도가 200대 경우, 300ms의 전송주기를 갖는 LDM 기반 분산혼잡제어는 안정성에 적합하지 않다는 것이 확인됨.



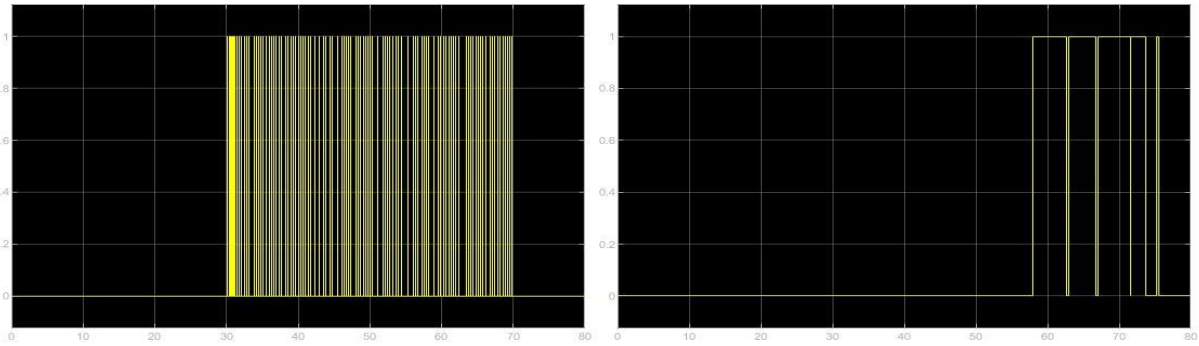
- 400대 LDM DCC(300ms) 메시지 수신 그래프와 차량 충돌 그래프
  - ✓ 시뮬레이션 시간이 63초일 때, 군집자율주행 차량들 사이에 충돌이 발생한 것을 확인할 수 있음.
  - ✓ 차량 단말 밀도가 400대 경우, 300ms의 전송주기를 갖는 LDM 기반 분산혼잡제어는 안정성에 적합하지 않다는 것이 확인됨.



- 400대 CBR DCC 메시지 수신 그래프와 차량 충돌 그래프

✓ 시뮬레이션 시간이 58초일 때, 군집자율주행 차량들 사이에 충돌이 발생한 것을 확인할 수 있음.

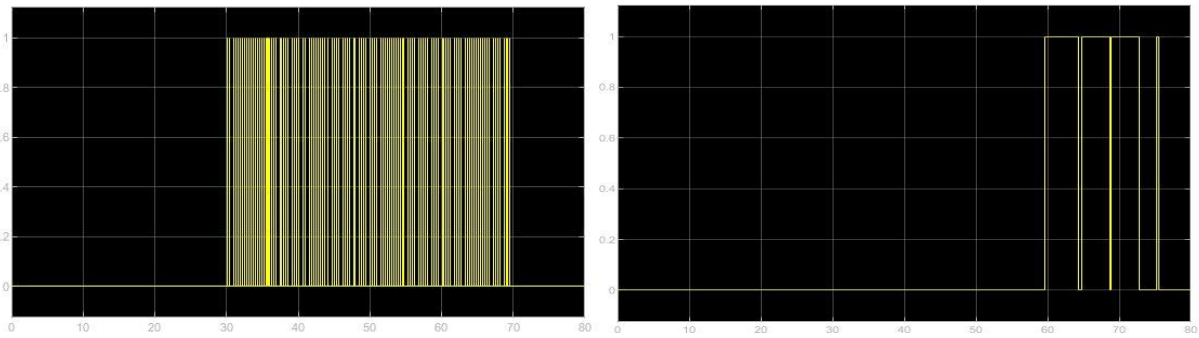
✓ 차량 단말 밀도가 400대 경우, CBR 기반 분산혼잡제어는 안정성에 적합하지 않다는 것이 확인됨.



- 1000대 LDM DCC(300ms) 메시지 수신 그래프와 차량 충돌 그래프

✓ 시뮬레이션 시간이 60초일 때, 군집자율주행 차량들 사이에 충돌이 발생한 것을 확인할 수 있음.

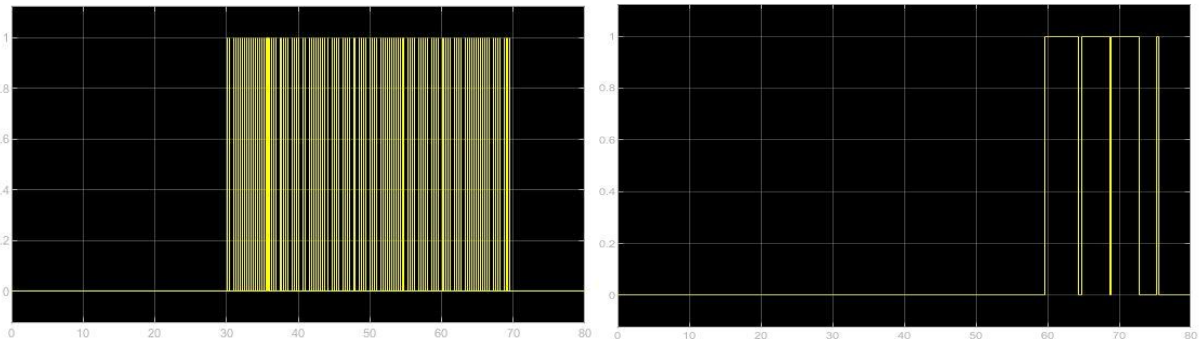
✓ 차량 단말 밀도가 1000대 경우, 300ms의 전송주기를 갖는 LDM 기반 분산혼잡제어는 안정성에 적합하지 않다는 것이 확인됨.



- 1000대 CBR DCC 메시지 수신 그래프와 차량 충돌 그래프

✓ 시뮬레이션 시간이 60초일 때, 군집자율주행 차량들 사이에 충돌이 발생한 것을 확인할 수 있음.

✓ 차량 단말 밀도가 1000대 경우, CBR 기반 분산혼잡제어는 안정성에 적합하지 않다는 것이 확인됨.



○ 200대의 경우에는 LDM DCC는 300, 400ms에서 차량 안전 서비스의 안정성 측면에서 적합하지 않으며, CBR DCC는 차량 안전 서비스의 안정성 측면에서 적합함.

○ 400대의 경우에는 LDM DCC는 300, 400ms에서 차량 안전 서비스의 안정성 측면에서 적합하지 않으며,

CBR DCC는 차량 안전 서비스의 안정성 측면에서 적합하지 않음.

○ 1000대의 경우에는 LDM DCC는 300, 400ms에서 차량 안전 서비스의 안정성 측면에서 적합하지 않으며, CBR DCC는 차량 안전 서비스의 안정성 측면에서 적합하지 않음.

	LDM DCC (100ms)	LDM DCC (200ms)	LDM DCC (300ms)	LDM DCC (400ms)	CBR DCC
200대	○	○	×	×	○
400대	○	○	×	×	×
1000대	○	○	×	×	×

[협력자율주행 통합 시뮬레이션 차량 안전 서비스 안정성 평가]

2km 내 차량 단말 밀도	CBR DCC 전송주기	LDM DCC 최적 전송주기
200대	100ms	100ms
400대	334ms	200ms
600대	500ms	200ms
800대	1,000ms	200ms
1,000대	1,000ms	200ms

[차량 단말 밀도에 따른 전송주기]

○ CBR 기반 분산혼잡제어와 LDM 기반 분산혼잡제어 기반 군집자율주행의 차량 안전 서비스 안정성 평가는 이전에 얘기한 차량 단말 밀도에 따른 LDM 기반 분산혼잡제어의 최적 전송주기와 연결해서 설명이 가능함.

○ 차량 단말 밀도가 200대 경우, LDM 기반 분산혼잡제어의 최적 전송주기는 100ms임. 그러나 협력자율주행 통합 시뮬레이션 차량 안전 서비스 안정성 평가를 통해 200ms도 적합하다고 판단됐으므로 최적 전송주기는 200ms가 가능함을 나타냄.

○ 차량 단말 밀도가 400, 1000대 경우, 최적 전송주기와 협력자율주행 통합 시뮬레이션 차량 안전 서비스 안정성 평가의 적합한 전송주기가 일치함을 확인할 수 있음.

○ 기존 CBR 기반 분산혼잡제어보다 우수한 성능을 보이는 LDM 기반 분산혼잡제어의 최적 전송주기는 다음과 같이 정리할 수 있음.

2km 내 차량 단말 밀도	CBR DCC 전송주기	LDM DCC 최적 전송주기
200대	100ms	200ms
400대	334ms	200ms
600대	500ms	200ms
800대	1,000ms	200ms
1,000대	1,000ms	200ms

[차량 단말 밀도에 따른 전송주기]

○ 최종적으로 제안하는 LDM 기반 분산혼잡제어 기술은 최적 전송 주기 200ms(최소 전송주기가 100ms인 3GPP LTE C-V2X R.14 기준)를 사용할 경우, 2km 내 차량 단말 밀도가 200대에서 1,000대로 증가하는 환경에서도 협력센싱과 협력머뉴버링의 안전서비스에 의해 충돌이 발생하지 않음을 확인할 수 있음.

다. 연구 개발 성과

(1) 국내외 논문 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCI 여부 (SCI / 비 SCI)	게재일	등록번호
1	Spectrum-Sharing Method for Co-Existence Between 5G OFDM-Based System and Fixed Service	IEEE Access	Walid A. Hassan	7	미국	IEEE	SCI	2019.06	
2	Preamble-Based Adaptive Channel Estimation for IEEE 802.11p	Sensors	최주영	19(13)	스위스	MDPI	SCI	2019.07	
3	Orthogonal Code-Based Transmitted Radiation Pattern Measurement Method for 5G Massive MIMO Antenna Systems	IEEE Transactions on Antennas and Propagation	박세주	68(5)	미국	IEEE	SCI	2020.05	
4	RRH Clustering Using Affinity Propagation Algorithm with Adaptive Thresholding and Greedy Merging in Cloud Radio Access Network	Sensors	박세주	21(2)	스위스	MDPI	SCI	2021.01	
5	Symbol-Level Selective Channel Estimation in Packet-Based OFDM Systems	Sensors	최주영	20(5)	스위스	MDPI	SCI	2020.02	
6	Intelligent Hybrid Fusion Algorithm with Vision Patterns for Generation of Precise Digital Road Maps in Self-driving Vehicles	KSII Transactions on Internet and Information Systems	정주호	14(10)	한국	Korean Society For Internet Information	SCI	2020.10	
7	IEEE 802.11p를 위한 향상된 가상 기준 신호 기반 MMSE 채널 추정 기법	한국통신학회 논문지	최주영	44(12)	한국	한국통신학회	비SCI	2019.12	
8	항공 이동형 지구국과 5세대 이동통신 간의 양립성 평가를 위한 간섭분석	한국전자파학회 논문지	김현기	30(9)	한국	한국전자파학회	비SCI	2019.09	
9	C-V2X를 위한 지역 혼잡도 정보를 이용한 분산 혼잡 제어	한국전자파학회 논문지	정구선	32(2)	한국	한국전자파학회	비SCI	2020.02	

(2) 국내 및 국제학술회의 발표

번호	논문명	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명	등록번호
1	Noise Suppression Chanel Estimation Method Using Deep Learning in IEEE 802.11p Standard	IEEE 2019 VTC FALL	이상헌	2019.09.24	Honolulu, Hawaii	미국	
2	Adjacent Channel Compatibility between OFDM based Earth Station in Motion and 5G	IEEE 2019 Globcomm	김현기	2019.12.13	Waikoloa, HI	미국	
3	Modeling Method for Interference Analysis Between IMT-2020 and Satellite in the mmWave Band	IEEE 2019 Globcomm	조연기	2019.12.13	Waikoloa, HI	미국	
4	Dynamic RRH Clustering using Affinity Propagation Algorithm in Ultra-Dense C-RAN	IEEE 92nd Vehicular Technology Conference: VTC2020-Fall	박세주	2020.11.18	Online	미국	
5	딥러닝 방식의 채널 추정을 위한 분류방법	2019 한국통신학회 하계종합 학술대회	이상헌	2019.06.20	제주 라마다프라자 호텔	한국	
6	지연 시간과 외부 간섭이 적용된 C-RAN 환경에서 Affinity propagation 클러스터링 알고리즘 분석	2019 한국통신학회 하계종합 학술대회	박세주	2019.06.20	제주 라마다프라자 호텔	힌극	
7	패킷 기반 OFDM 시스템에서의 심볼 레벨 선택적 채널 추정	2019 한국통신학회 하계종합 학술대회	최주영	2019.06.20	제주 라마다프라자 호텔	힌극	
8	3GPP 비 지상 네트워크(NTN) NB-IOT의 링크성능 분석	2020년 한국전자파학회 하계종합학술대회	김민규	2020.08.21	제주 라마다프라자 호텔	한국	
9	C-V2X Mode 4 통신의 매체 접근 제어와 물리 계층을 고려한 통합 성능 분석	2020년 한국전자파학회 하계종합학술대회	양우열	2020.08.21	제주 라마다프라자 호텔	힌극	
10	부분자율주행차의 V2X기반 돌발상황 경고에 대한 제어권 전환 요구 및 성능 분석	2020년 한국전자파학회 하계종합학술대회	김승학	2020.08.21	제주 라마다프라자 호텔	힌극	
11	LTE C-V2X Mode 4의 MAC 분산 혼잡 제어 기반 플래투닝 시나리오 응용 계층 평가	2020년 한국ITS학회 추계종합학술대회	정구선	2020.11.19	제주한라대학교 한라컨벤션센터	힌극	

(3) 지식재산권(특허, 실용신안, 의장, 디자인, 상표, 규격, 신품종, 프로그램)

번호	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원			등록			기여율(%)
			출원인	출원일	출원번호	등록인	등록일	등록번호	
1	METHOD AND APPARATUS FOR PERFORMING WIRELESS COMMUNICATION THROUGH CHANNEL STATE PREDICTION USING LOCAL DYNAMIC MAP	미국	문철	2020.11	17093294				100
2	차량 운행 상태 및 V2X 서비스 QoS를 이용한 분산혼잡제어 방법 및 장치	한국	한국교통대 산학협력단	2019.11	10-2019-0152755				50
3	강화학습 기반의 신경망을 이용한 VANET의 분산혼잡제어 방법 및 장치	한국	한국교통대 산학협력단	2019.12	10-2019-0158178				100
4	지역 동적 지도를 이용한 분산혼잡제어를 위한 방법 및 장치	한국	한국교통대 산학협력단	2020.11	10-2020-0148328				50
5	지역 동적 지도를 이용한 채널상태 예측을 통한 무선 통신을 수행하기 위한 방법 및 장치	한국	한국교통대 산학협력단	2020.11	10-2020-0148222				100

(4) 저작권 (소프트웨어, 서적 등)

번호	저작권 명	창작일	저작자 명	등록일	등록번호	저작권자명	기여율(%)
1	C-V2X 물리계층 링크레벨 시뮬레이터	2019.11.26	한밭대학교 산학협력단	2019.11.29	C-2019-036388	한밭대학교 산학협력단	100
2	V2X 통신 네트웍의 혼잡제어 기술 구현 및 성능평가를 위한 C-V2X MAC 시뮬레이션 프로그램	2019.11.26	연세대학교 산학협력단	2019.11.29	C-2019-036388	연세대학교 산학협력단	100
3	물리계층과 매체접속제어 통합 차량통신 시뮬레이터	2020.12.27	한밭대학교 산학협력단	2021.01.06	C-2019-036388	한밭대학교 산학협력단	100
4	C-V2X 환경에서의 심층 강화학습 기반의 통신 알고리즘 개발 및 평가 시뮬레이터	2020.12.21	연세대학교 산학협력단	2020.12.29	C-2020-052993	연세대학교 산학협력단	100
5	3GPP LTE C-V2X(셀룰러 자동차통신)를 위한 LDM(동적지도)기반 분산혼잡제어기술 성능 분석 시뮬레이터	2020.12.09	한국교통대학교 산학협력단	2020.12.31	C-2020-053774	한국교통대학교 산학협력단	100

(5) 전문 연구 인력 양성

번호	취득학위	이름	성별	취득학위 논문명	학위 취득일	지역
1	박사	박진관	남자	Radio Frequency Active Sensor Systems for Humidity and Vital Sign Detection	2020.08.28	수도권
2	박사	이현재	남자	Non-contact vital signs detection algorithms for multiple subjects using 24 GHz FMCW Doppler radar	2020.08.28	수도권
3	석사	윤현호	남자	교차로 안전 우회전 통행을 지원하는 엣지 컴퓨팅 기반 협력 센싱 시스템 연구	2020.02.20	충청권
4	석사	김현기	남자	이동형 지구국과 5G 서비스의 양립을 위한 인접채널 간섭분석 및 완화 기술	2020.02.21	충청권
5	석사	조연기	남자	밀리미터파 대역에서 5G 이동통신과 위성 업무간 공존 연구	2020.02.21	충청권
6	석사	김승학	남자	가상환경기반 자율주행 운전능력 평가를 위한 시뮬레이터 개발	2021.02.18	충청권
7	석사	정구선	남자	3GPP LTE C-V2X Mode 4를 위한 Local Dynamic Map 기반 분산 혼잡 제어 기술	2021.02.18	충청권
8	석사	홍창의	남자	Characterization of the Rubber-Type Test Socket Using the De-embedding Technique	2021.02.22	수도권

(6) 기술 거래(이전) 등

번호	기술 이전 유형	기술 실시 대상 기관	기술 실시 발생일	기술료
1	특허 기술 이전	㈜조인트리	2020.07.03	계약금액 : 500,000,000 원 1차 입금액 : 11,000,000 원

3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

가. 목표

<table>
<tr><th colspan="3">구분</th><th>내용</th></tr>
<tr><td colspan="3">최종 목표</td><td>• 본 연구에서는 3GPP LTE 기반의 4G C-V2X(Rel.14) / 5G LTE eV2X(Rel.15)의 차량간 통신(V2V)과 차량과 RSU(Road Side Unit)간 통신(V2R/R2V)을 수행하는 Mode 4에서, 도심의 다양한 운행 환경 및 차량 밀도 그리고 협력자율주행 서비스에 따라 메시지 전송주기 및 송신전력 등을 적응적으로 최적화하는 V2X 네트웍 분산혼잡제어 기술을 개발함.
• 또한, 개발된 V2X 네트웍 분산혼잡제어 기술의 성능을 자율협력주행 시나리오 기반 트래픽 시뮬레이터와 V2X의 PHY/MAC cross-layer 시뮬레이터가 연동된 자율협력주행 통합 시뮬레이션 플랫폼을 통해 분석하고 검증을 수행함.</td></tr>
<tr><td rowspan="4">세부목표</td><td rowspan="3">1차년도</td><td>자율협력주행을 위한
V2X 네트웍
분산혼잡제어
기술</td><td>• 3GPP LTE C-V2X(Rel.14) / 5G LTE eV2X(Rel.15)의 Mode 4 표준분석 및 기존 V2X 네트웍 분산혼잡제어 기술 조사
• 기존 V2X 네트웍 분산혼잡제어 기술에 대한 성능 분석을 통한 분산혼잡제어를 위한 파라메터 도출
• 차량 밀도 및 이동속도, 그리고 교통환경에 따라 적응적으로 최적화하는 V2X 네트웍 분산혼잡제어 기술 아이디어 도출
• 협력자율주행 서비스별 상이한 요구 성능을 동시에 만족시키는 V2X 네트웍 분산혼잡제어 기술 아이디어 도출</td></tr>
<tr><td>C-V2X
Cross-layer
(PHY/MAC)
시뮬레이터</td><td>• 3GPP LTE C-V2X(Rel.14) / 5G LTE eV2X(Rel.15)의 PHY와 MAC 표준 분석을 통한 MAC 계층 Sensing-based Semi-Persistent Scheduling 기술 분석
• 각 계층별(무선채널/PHY/MAC) 시뮬레이터 개발
• 각 계층별(무선채널/PHY/MAC) 시뮬레이터 성능 검증</td></tr>
<tr><td>자율협력주행
통합
시뮬레이션
플랫폼</td><td>• 협력 센싱, 협력 머뉴버링, 플래투닝의 협력자율주행 서비스별 평가 시나리오 분석을 통한 시나리오 도출
• 협력자율주행 서비스에 필요한 V2V 교환 정보를 정의하고 이에 대한 메시지 개발
• Prescan 기반 협력자율주행 시나리오 수행 트래픽 시뮬레이터 개발
• 개발된 메시지를 트래픽 시뮬레이터에 구현하고 협력자율주행 서비스별 시나리오별로 성능 검증</td></tr>
<tr><td rowspan="3">2차년도</td><td>자율협력주행을 위한
V2X 네트웍
분산혼잡제어
기술</td><td>• 개발된 V2X 네트웍 분산혼잡제어 기술을 자율협력주행 통합 시뮬레이션 플랫폼에 구현하고 성능을 분석
• 차량 밀도 및 이동속도, 그리고 교통환경에 따라 개발된 V2X 네트웍 분산혼잡제어 기술의 성능을 분석하고 최적화 수행
• 다양한 도심환경에서 협력자율주행 시나리오 별로 V2X 분산혼잡제어 기술에 의한 협력자율주행 성능 검증</td></tr>
<tr><td>C-V2X
Cross-layer
(PHY/MAC)
시뮬레이터</td><td>• 무선채널과 PHY 시뮬레이터 통합
• 무선채널 & PHY 시뮬레이터와 MAC 시뮬레이터 통합
• PHY&MAC cross-layer 시뮬레이터와 협력자율주행 트래픽 시뮬레이터와의 통합</td></tr>
<tr><td>자율협력주행
통합
시뮬레이션
플랫폼</td><td>• 협력자율주행 트래픽 시뮬레이터와 Cross-layer 시뮬레이터 통합
• 협력자율주행 통합 시뮬레이션 플랫폼 기반 신규 기술 시험 및 최적화
• 협력자율주행 통합 시뮬레이션 플랫폼 기반 신규 기술 성능 검증</td></tr>
</table>

나. 목표 달성 여부

(1) 최종 성과 목표 및 달성치

구분	핵심성과물(CTE)		단위성과물		성과점검기준							양적성과목표
					질적 성과지표		목표치/달성치	측정 방법	검증 방법	가중치 (%)	해당 기관	예산 (백만원)	목표치/달성치
공동	A	V2X 네트웍 분산 혼잡제어 기술	A-1	3GPP C-V2X/eV2X Mode 4에서 Sensing-based SPS 기반의 V2X 네트웍 분산혼잡제어 기술 개발	①	패킷전송률	99.99% / 99.99% (달성)	전송에 성공 패킷 비율	C-V2X Cross-layer 시뮬레이터 성능 분석, 전문가 공개 시연 평가	15	연세 대학교	135.0	논문(SCI학술지): 1/2건 논문(국내학술지): 1/1건 논문(발표) : 2/3건 특허(국내출원) : 1.5/1.5건 특허(국내등록) : 2/0건 SW(등록) : 2/2건 기술이전 : 0/1건
					②	전송지연	20ms / 20ms (달성)	메시지 생성부터 수신에 걸리는 시간		15			
공동	B	C-V2X Cross-layer 시뮬레이터	B-1	C-V2X와 eV2X의 PHY 계층과 MAC계층 통합 cross-layer 시뮬레이터 개발	①	시뮬레이터의 정확도	90% 이상 / 91% 이상 (달성)	타 연구결과와 비교	시뮬레이터 시연 및 검증	30	한밭 대학교	100.0	논문(SCI학술지): 2/2건 논문(국내학술지):1/1건 논문(발표) : 1/4건 SW(등록) : 2/2건
주관	C	자율협력주행 통합 시뮬레이션 플랫폼	C-1	교통환경 및 자율협력주행 시나리오 기반 V2X 네트웍 분산혼잡제어 성능 평가	①	협력센싱 성공률	99% 이상 / 100% (달성)	협력센싱에 의한 추가적인 인식 성공율	협력자율주행통합 시뮬레이션에서 시나리오 기반 평가, 전문가 공개 시연 평가	20	한국 교통 대학교	135.0	논문(SCI학술지) :2/2건 논문(국내학술지):1/1건 논문(발표) : 1/4건 특허(국내출원) : 3/1.5건 특허(해외출원) : 0/1건 SW(등록) : 1/1건 보고서 : 1/1건
					②	협력머뉴버링 성공률	99% 이상 / 100% (달성)	머뉴버 메시지를 수신 성공률		20			
계												370.0	논문(SCI학술지): 5/6건 논문(국내학술지):3/3건 논문(발표) : 4/11건 특허(국내등록) : 2/0건 특허(국내출원) : 4.5/3건 특허(해외출원) : 0/1건 SW(등록) : 5/5건 기술이전 : 0/1건 보고서 : 1/1건

(2) 질적 성과 목표 및 달성치

구분	핵심성과물 (CTE)		단위성과물		성과점검기준								증빙자료
					질적 성과지표		목표치/ 달성치	측정 방법	검증 방법	가중치 (%)	해당 기관	예산 (백만원)	
공동	A	V2X 네트웍 분산 혼잡제어 기술	A-1	3GPP C-V2X/eV2X Mode 4에서 Sensing-based SPS 기반의 V2X 네트웍 분산혼잡제어 기술 개발	①	패킷전송률	99.99% / 99.99% (달성)	전송에 성공 패킷 비율	C-V2X Cross-layer 시뮬레이터 성능 분석, 전문가 공개 시연 평가	15	연세 대학교	135.0	본 보고서 p.160~161
					②	전송지연	20ms / 20ms (달성)	메시지 생성부터 수신에 걸리는 시간		15			
공동	B	C-V2X Cross-layer 시뮬레이터	B-1	C-V2X와 eV2X의 PHY 계층과 MAC계층 통합 cross-layer 시뮬레이터 개발	①	시뮬레이터의 정확도	90% 이상 / 91% 이상 (달성)	타 연구결과와 비교	시뮬레이터 시연 및 검증	30	한밭 대학교	100.0	본 보고서 p.98~99
주관	C	자율협력주행 통합 시뮬레이션 플랫폼	C-1	교통환경 및 자율협력주행 시나리오 기반 V2X 네트웍 분산혼잡제어 성능 평가	①	협력센싱 성공률	99% 이상 / 100% (달성)	협력센싱에 의한 추가적인 인식 성공율	협력자율주행통합 시뮬레이션에서 시나리오 기반 평가, 전문가 공개 시연 평가	20	한국 교통 대학교	135.0	본 보고서 p.164~167
					②	협력머뉴버링 성공률	99% 이상 / 100% (달성)	머뉴버 메시지를 수신 성공률		20			
계												370.0	

○ 질적 성과 목표에 대한 자체 평가

<table>
<tr><th colspan="2">성과 목표</th><th>자체 평가</th></tr>
<tr><td>A</td><td>3GPP C-V2X/eV2X Mode 4에서 Sensing-based SPS 기반의 V2X 네트웍 분산혼잡제어 기술 개발</td><td>
▪ 본 보고서 p.160~161 참고 (아래표는 p.161에서 발췌)
<table>
<tr><th colspan="2"></th><th>패킷 성공률 99.99%를 만족하는 송수신기 거리</th><th>전송지연 시간 분포의 95%를 만족하는 IPG (ms)</th></tr>
<tr><td rowspan="5">80대</td><td>CBR DCC</td><td>5m</td><td>334ms</td></tr>
<tr><td>LDM DCC(20ms)</td><td>8m</td><td>20ms</td></tr>
<tr><td>LDM DCC(30ms)</td><td>31m</td><td>30ms</td></tr>
<tr><td>LDM DCC(40ms)</td><td>37m</td><td>40ms</td></tr>
<tr><td>LDM DCC(50ms)</td><td>42m</td><td>50ms</td></tr>
</table>
▪ 3GPP LTE C-V2X R.15(eV2X)에서는 메시지 최소 전송 주기를 20ms로 하고, 혼잡도에 따라 최대 1s까지 전송주기를 조절할 수 있음. 따라서, LDM 정보를 이용하여 차량 혼잡도를 추정하고, 메시지 전송 주기를 20ms, 30ms, 40ms, 50ms로 조절하는 LDM DCC 기술을 제안하고 성능을 분석함.
▪ 제안하는 LDM DCC(20, 30, 40 ,50ms)는 2km 반경 내에 80대의 차량이 밀집한 환경에서 PDR 99.99%를 만족하는 송수신기 간 거리를 8m에서 42m까지 지원할 수 있음을 확인하였음.
▪ 2km 반경 내에 80대의 차량이 밀집한 환경에서 전송지연 시간 분포의 95%를 만족하는 IPG의 경우에 334ms 인 반면, 제안하는 LDM DCC는 최소 20ms 전송 지연을 보장할 수 있음을 확인함.
▪ 따라서, 본 연구에서 개발한 분산혼잡제어 기술인 LDM DCC가 패킷전송률 99.99% 이상을 달성하고 최소 20ms 전송 지연을 보장할 수 있음을 확인하여, 목표치를 달성하였음.
</td></tr>
<tr><td>B</td><td>C-V2X와 eV2X의 PHY 계층과 MAC계층 통합 cross-layer 시뮬레이터 개발</td><td>
▪ 본 보고서 p.98~99 참고
▪ 본 연구에서 개발한 물리/MAC cross-layer 시뮬레이터의 성능을 검증하기 위해, 3GPP R1-160284[10] 문서에서의 BLER 그래프와 3GPP R-1611594 문서[11]에서의 PDR 성능 그래프를 개발한 PHY/MAC Cross-layer 통합 시뮬레이터의 성능 그래프와 비교 분석하여 개발한 시뮬레이터의 정확도를 진행함.
▪ 아래 p.98~p.99 페이지에서 발취한 표와 같이 성능 정확도가 모든 PDR에 대해 91% 이상을 달성하며, 목표치 90%를 달성함.
<table>
<tr><th rowspan="2">기준 SNR (dB)</th><th colspan="2">3GPP R1-1610284 PER (%)</th><th rowspan="2">제안한 C-V2X PHY 시뮬레이터 PER (%)</th><th colspan="2">오차 (%)</th></tr>
<tr><th>최소값</th><th>최대값</th><th>최소값</th><th>최대값</th></tr>
<tr><td>-2</td><td>91</td><td>97</td><td>88.8</td><td>2.2</td><td>8.2</td></tr>
<tr><td>0</td><td>73</td><td>81</td><td>70.8</td><td>2.2</td><td>10.2</td></tr>
<tr><td>2</td><td>47</td><td>58</td><td>45.2</td><td>1.8</td><td>12.8</td></tr>
<tr><td>4</td><td>23.5</td><td>31.5</td><td>23.6</td><td>-0.1</td><td>7.9</td></tr>
<tr><td>6</td><td>9.7</td><td>15.5</td><td>9.6</td><td>0.1</td><td>5.9</td></tr>
<tr><td>8</td><td>3.6</td><td>5.5</td><td>5.4</td><td>-1.8</td><td>0.1</td></tr>
<tr><td>10</td><td>0.9</td><td>1.8</td><td>2.4</td><td>-1.5</td><td>-0.6</td></tr>
</table>
최소값 오차의 RMS = 1.62 %, 최대값 오차의 RMS = 7.8%
[PHY layer에 대한 정확도 비교 결과]
</td></tr>
</table>

<table>
<tr><td></td><td></td><td>
<table>
<tr><th>PDR</th><th>밀도</th><th>R1-1611594 Distance</th><th>개발한 시뮬레이터 Distance</th><th>정확도 (%)</th></tr>
<tr><td rowspan="3">0.7</td><td>738</td><td>125</td><td>120</td><td>96</td></tr>
<tr><td>554</td><td>165</td><td>160</td><td>97</td></tr>
<tr><td>369</td><td>240</td><td>240</td><td>100</td></tr>
<tr><td rowspan="3">0.5</td><td>738</td><td>180</td><td>165</td><td>91</td></tr>
<tr><td>554</td><td>240</td><td>230</td><td>95</td></tr>
<tr><td>369</td><td>x</td><td>x</td><td>x</td></tr>
<tr><td rowspan="3">0.2</td><td>738</td><td>300</td><td>280</td><td>93</td></tr>
<tr><td>554</td><td>x</td><td>x</td><td>x</td></tr>
<tr><td>369</td><td>x</td><td>x</td><td>x</td></tr>
</table>
[MAC layer에 대한 정확도 비교 결과]
</td></tr>
<tr><td>C</td><td>교통환경 및 자율협력주행 시나리오 기반 V2X 네트워크 분산혼잡제어 성능 평가</td><td>
▪ 본 보고서 p.164~167 참고
▪ 본 연구에서 개발한 LDM DCC의 성능을 자율협력주행 시나리오(플래투닝)상에서 분석하였음. LDM DCC 분산혼잡제어 기술이 탑재된 5대의 차량이 V2V통신에 의해 협력센싱과 협력 머뉴버링을 수행하면서, 다양한 도로 및 교통환경에서 차간 간격을 유지하면서 군집주행에 성공하는 비율을 측정함.
▪ 아래 p.167페이지에서 발취된 표를 참고하면, LDM DCC에 의해 전송주기를 100ms와 200ms로 조절할 경우, 주위 차량의 밀도가 2㎞반경 내 200대, 400대, 1000대 등의 밀집환경에서도 100% 성공을 하는 것을 확인할 수 있음.
▪ 이에 반해 기존 CBR DCC의 경우에는 200대의 저밀도 환경에서만 군집주행이 성공함을 확인할 수 있음.
▪ 따라서, 목표치인 협력센싱과 협력머뉴버링 99% 이상을 달성함.
<table>
<tr><th></th><th>LDM DCC (100ms)</th><th>LDM DCC (200ms)</th><th>LDM DCC (300ms)</th><th>LDM DCC (400ms)</th><th>CBR DCC</th></tr>
<tr><td>200대</td><td>○</td><td>○</td><td>×</td><td>×</td><td>○</td></tr>
<tr><td>400대</td><td>○</td><td>○</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td></tr>
<tr><td>1000대</td><td>○</td><td>○</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td></tr>
</table>
[협력자율주행 통합 시뮬레이션 차량 안전 서비스 안정성 평가]
</td></tr>
</table>

(3) 정량적 연구성과 목표 및 달성도

구분		1차년도 (2019)		2차년도 (2020)		총합		비고
		목표	달성률	목표	달성률	목표	달성률	
국외 논문 게재	SCI	2	100% (2)	3	133% (4)	5	120% (6)	
국내 논문 게재	비SCI	2	100% (2)	1	100% (1)	3	100% (3)	
국내, 외 논문 발표	국내 학술대회	3	200% (6)	1	500% (5)	4	275% (11)	
	해외 학술대회							
국내, 외 특허 출원	국내	1.5	100% (1.5)	3	50% (1.5)	4.5	67% (3)	
	국외	0	0	0	초과달성 (1)	0	초과달성 (1)	
	계	1.5	100% (1.5)	3	83% (2.5)	4.5	89% (4)	
국내 특허 등록	국내	0	0	0	0	2	미달 (2)	
	국외	0	0	0	0	0	0	
	계	0	0	0	0	2	미달 (2)	
인력 양성	석사	3	100% (3)	3	100% (3)	6	100% (6)	
	박사	0	0	2	100% (2)	2	100% (2)	
	계	3	100%	5	100% (5)	8	100% (8)	
기술 이전	계약 건수	-	-	0	초과달성 (1)	0	초과달성 (1)	
	계약액	-	-	0	5 억원	0	5 억원	
		-	-	-	-	-	-	
국제 표준화	기고서 제출	-	-	-	-	-	-	
	기고서 채택	-	-	-	-	-	-	
	표준안 채택	-	-	-	-	-	-	
국내 표준화	기고서 제출	-	-	-	-	-	-	
	기고서 채택	-	-	-	-	-	-	
	표준안 채택	-	-	-	-	-	-	
등록·기탁 대상 성과물	보고서 원문	-	-	-	-	-	-	
	연구시설·장비	-	-	-	-	-	-	
	기술요약정보	-	-	-	-	-	-	
	생명자원 생명정보	-	-	-	-	-	-	
	생명자원 생물자원	-	-	-	-	-	-	
	생명자원 신품종	-	-	-	-	-	-	
	소프트웨어	2	100% (2)	3	100% (3)	5	100% (5)	

○ 정량 성과 목표에 대한 자체 평가

성과 목표	자체 평가
논문 실적	▪ SCI 논문 총 6편으로 목표인 5편보다 초과 달성함. 이때 논문은 기여율 20% 논문 1편과 기여율 50% 논문 3편, 기여율 100% 논문 2편으로 총 3.7편의 논문을 게재하였음. ▪ 국내 논문은 총 3편을 게재하였으며, 기여율 33% 논문 1편, 기여율 50% 논문 2편을 게재하여 총 1.3편의 논문을 게재하였음. ▪ 논문 게재 실적의 경우, 국외논문은 목표 편수에 초과 게재하고, 국내논문은 목표편수에 맞춰 게재하였으나, 기여율을 고려하였을 때 약간 미달되었음. 하지만 국외와 국내의 논문발표에 대한 초과 실적을 고려할 때 전체적으로 양호한 논문 실적으로 판단됨. ▪ 논문 발표 실적은 총 11편으로 해외 학술대회 4건, 국내 학술대회 7건으로 총 11건의 논문을 발표하였음. 본 학술대회 발표 논문은 이후 논문 게재를 진행 중에 있으며, 이를 통해 추가적인 논문게재 성과를 기대할 수 있음.
특허 출원 및 SW 등록	▪ 국내 특허출원에서 정량목표인 특허 4.5건에서 해외 특허출원을 포함하여 4건을 완료하였고, 0.5건이 미달하였음. 기여율을 고려할 때 기여율 50%의 국내 특허출원을 2건, 기여율 100%의 국내 특허출원을 2건과 해외 특허출원을 1건으로 총 4건을 특허를 출원하였음. ▪ 출원 한 특허 중 “차량 운행 상태 및 V2X 서비스 QoS를 이용한 분산혼잡제어 방법 및 장치(10-2019-0152755)” 특허는 21년 2월 8일자로 특허 등록이 결정되었으며, 등록 절차를 진행 중에 있음. (다음 페이지 특허 등록결정서 참고). 따라서, 특허 등록은 1건이 미달하였지만, 1차년도에 출원한 특허에 대해 심사가 진행 중이며, 본 연구에서 제안하는 분산혼잡제어 기술은 독창적인 개념의 기술이므로 특허성을 인정받아 올 해 상반기내로 등록 결정을 받을 것으로 판단됨. ▪ SW 저작권 등록에서 정량목표인 5건 등록에서 5건 등록을 완료하여 목표를 달성하였음. ▪ 특허 출원 실적은 정량목표 4.5건에서 성과 4건으로 약간 미달하였으나, 초과 달성한 국제특허 1건 출원에 가중치를 부여할 경우 양호한 실적으로 판단됨.
인력양성	▪ 1차년도에서 석사과정 3인 양성 목표를 달성하였음. ▪ 2차년도에서 박사인력 2인 및 석사과정 3인 양성 목표를 달성하였음. ▪ 따라서, 총괄 목표인 석사인력 6인 및 박사인력 2인 양성을 달성하였음.
기술이전	▪ 기술이전 실적은 초과 달성함. ▪ 계약기술 명 “차량 운행 상태 및 V2X 서비스 QoS를 이용한 분산혼잡제어 방법 및 장치 (특허출원번호 10-2019-0152755)”의 특허 기술이전 계약을 진행함. ▪ 계약의 기술료 규모는 5억원이며, 1천 1백만원이 1차분 입금되었음.

[특허 결정서]

발송번호: 9-5-2021-011558469
발송일자: 2021.02.08.

수신 서울특별시 금천구 가산디지털1로 196, 303호(가산동, 에이스테크노타워10차)
특허법인지원 귀하(귀중)

08502

YOUR INVENTION PARTNER

특 허 청

특허결정서

출원인	성명	한국교통대학교산학협력단 (특허고객번호: 220040135375)
	주소	충청북도 충주시 대소원면 대학로 50
대리인	명칭	특허법인지원
	주소	서울특별시 금천구 가산디지털1로 196, 303호(가산동, 에이스테크노타워10차)
발명자	성명	문철
	주소	경기도 용인시 처인구 양지면 학촌로70번길 34-9 삼성전원마을 B24호
출원번호		10-2019-0152755
발명의 명칭		차량 운행 상태 및 V2X 서비스 QoS를 이용한 분산혼잡제어 방법 및 장치
청구항 수		16

이 출원에 대하여 특허법 제66조에 따라 특허결정합니다.
(특허권은 특허료를 납부하여 특허법 제87조에 따라 설정등록을 받음으로써 발생하게 됩니다.) 끝.

[참고문헌]

1. WO2017034258 A1
2. WO2018084590 A1

2021.02.08.

특허청 전기통신기술심사국

통신심사과 심사관 성인구 성인구

<< 안내 >>

【 등록료 납부, 전자등록증 발급 서비스 개시, 특허기술상신청 안내 및 등록공보 확인 등 】

1. 등록료 납부안내
   - o 특허료 납부예정금액(1~3년차분) : 669,000 원(1~3년차분을 정상납부기간내에 납부하는 경우), 334,500 원(50% 감면대상자인 경우), 200,700 원(70% 감면대상자인 경우)
   - o 특허료의 정상납부기간을 경과하여 추가납부하거나, 특허료납부기간 중 특허료의 변경요인이 있을 때에는 위 납부금액이 달라질 수 있습니다.
   - o 자세한 안내는 아래의 첨부파일(특허료 납부 안내)을 참조하시기 바랍니다.
2. 출원인은 이 특허결정서를 송달받은 날로부터 3개월 이내의 기간(다만, 특허법 제79조에 따른 설정등록을 받으려는 날이 3개월보다 짧은 경우에는 그 날까지의 기간)에 분할출원을 할 수 있습니다.
3. 2018. 7. 1. 설정 등록부터 전자등록증 발급이 시행되었습니다. 특허로(http://www.patent.go.kr)에서 「전자등록증 신청」을 사전에 하거나, 납부서(특허권 등의 등록령 시행규칙 서식 제25호)에 등록증 수령 방법을 전자문서 수령으로 선택하면 「전자등록증 수신함」을 통해 전자등록증 파일을 내려 받을 수 있습니다. 만약, 전자등록증을 사전에 신청하지 않고 등봉된 납입고지서로 설정등록료를 납부하면 기존과 동일하게 서면 등록증으로 발급됩니다.
4. 내국인은 매년 2월, 8월경 특허기술상 홈페이지(http://www.patent.go.kr/jsp/kiponet/mp/patentprize/index.hts)에 공지된 신청기간에 아래 요건을 만족하는 발명(고안)에 대해 특허기술상을 신청하실 수 있습니다.
   - o 신청기준일(상반기의 경우 매년 2월 1일, 하반기의 경우 매년 8월 1일)로부터 5년 이내에 설정등록된 발명(고안)
   - o 특허발명을 실시하기 위하여 「약사법」 또는 「농약관리법」에 따라 허가를 받거나 등록 등을 하여야 하고, 그 허가 또는 등록 등을 위하여 유효성·안전성 등의 시험이 필요한 발명으로서 신청기준일로부터 5년 이내에 제품을 출시하여 매출이 발생한 발명
5. 출원인은 설정등록일로부터 3개월 이내에 (다만, '12.3.15. 이후의 출원이고, 특허권의 설정등록이 특허출원일로부터 4년과 출원심사 청구일로부터 3년 중 늦은 날보다 지연된 경우에 한 함) 등록지연에 따른 특허권의 존속기간의 연장등록출원을 할 수 있습니다.

※ 등록공보는 등록수수료를 납부하신 후 7일 전후로 특허청 홈페이지(특허마당→인터넷공보)에서 확인하실 수 있습니다. 다만 심사관의 직권 보정사항이 있으면 평균 등록일로부터 약 30일 정도 더 소요될 수 있습니다.

※ 「특허로」 고객센터에서 알림서비스를 신청하시면 담당 심사관 지정 알림, 마감기한 알림 등 각종 민원처리 사항을 이메일과 휴대폰(SMS)으로 받아 보실 수 있습니다.

※ 특허청 국제지식재산연수원에서는 전 국민을 대상으로 지식재산 인식제고를 위해 무료 온라인 교육서비스(www.ipacademy.net)를 제공하고 있으니 많은 이용 바랍니다.

※ 위에서 안내한 후속 절차 또는 신청 서식 등에 관한 사항은 특허고객상담센터 ☎1544-8080로, 이 통지서 결정 내용에 대한 사항은 특허청 ☎042-481-8485(담당심사관 성인구)로 문의하시기 바랍니다.

※ 특허청 및 특허청 직원은 법령에서 정한 법정 수수료 외에 출원인 또는 대리인으로부터 일체의 금품·향응 및 편의제공을 요구하거나 받지 않습니다. 이러한 요구나 사례를 인지 또는 목격하였을 경우, 특허청 홈페이지(https://www.kipo.go.kr) 공직비리신고센터(특허청-민원/참여-국민신고-공직비리신고센터)로 신고하여 주시기 바랍니다.

※ (특허청) 우 35208 대전광역시 서구 청사로 189, 4동 (둔산동, 정부대전청사)

국민의 소중한 지식재산, 특허청 특별사법경찰이 책임지고 지키겠습니다!

(3) 외부 전문가로 구성된 검증위원회의 평가

○ 위원회 구성

순번	소속 기관명 및 직위	이름
1	한국교통대학교 교수	임성묵
2	원광대학교 교수	복경수
3	켐트로닉스 수석	박종희

○ 평가회의 개최: 한국교통대학교 교통ICT 융합연구센터(2020년 12월 16일 오후 2시~4시)

○ 평가 내용

① V2X 네트웍 분산 혼잡제어 기술, C-V2X Cross-layer 시뮬레이터, 자율협력주행 통합 시뮬레이션 플랫폼의 세가지 핵심 성과물에 대해 시뮬레이션 수행 과정과 결과를 분석하여 질적 성과를 달성 정도를 평가함.

② 양적 성과목표와 결과물을 검토하고 정량 성과에 대한 달성 정도를 평가함.

○ 평가 결과

평가자 (120점 만점)	질적 성과 평가 (20점)	정량 성과 평가 (100점)
A (110점)	▪ 시뮬레이션 수행 시간이 많이 걸려, 전체적인 과정을 평가하지 못했으나, 개발된 여러 계층 통합 시뮬레이터는 난이도가 상당히 높음 ▪ 추가적으로 더 많은 시뮬레이션 수행을 통해 통계적인 결과를 제시할 필요가 있음	▪ 기여율을 고려할 때, 논문과 특허 실적이 약간 부족함. 그러나 기술이전 등 추가적으로 우수한 연구결과 달성함 ▪ 기 제출된 국제학술대회 논문을 SCI급 논문으로 확장해서 발전시킬 필요 있음 ▪ 유사분야 타 기관 전문가와의 워크샵 및 세미나 추진이 필요함
	15 점	95 점
B (88점)	▪ 시뮬레이션 방법론을 자세히 제시해서, 평가자들이 시뮬레이터의 객관성에 대해 검증할 수 있도록 하는 것이 추가적으로 필요함. ▪ 타 연구에서 볼 수 없었던, MAC과 협력자율주행 서비스 시뮬레이터를 통합한 것은 아이디어가 좋으며, 좀 더 완성도 높게 개발하면 타 연구에도 많은 기여를 할 수 있을것으로 판단됨. ▪ 질적 성과들이 SCI와 국내 논문지에 의해 게제되어 객관적으로 평가되고 검증됨.	▪ 논문, 특허, 인력 양성 등 목표하는 성과를 대부분 초과 달성함. ▪ 특히, 연구성과물을 다수의 특허로 출원한 성과가 우수함. 국제특허도 출원함.
	15 점	100점
C (90점)	▪ 당 과제는 국가시책사업인 자율주행 부문에 시급히 필요한 기술적 내용을 그 목표로 하고 있으며, ▪ 과제 수행에 있어서 당해연도 과제목표 및 산출물 수준을 준수하고 있음.	▪ 대부분의 정량 실적을 달성함 ▪ 특허 실적이 우수함 ▪ 기업체에서도 관심을 갖는 기술이며, 기술이전을 위한 적극적인 노력을 하면 성과가 있을 것임.

평가자 (120점 만점)	질적 성과 평가 (20점)	정량 성과 평가 (100점)
	▪ 당 과제는 TRL-4를 목표 수준으로 설정하였으므로, 당 과제를 통하여 생산한 산출물이 국가 정책 및 산업계 개발활동에 직접적인 도움을 줄 수 있도록 과제 완료시 민/관 연관 분야에서의 활용성을 증대하는 TRL-7 목표의 추가 과제 활동이 필요함.	
	14점	98점

4. 연구개발성과의 활용계획

가. 연구개발성과의 활용방안

○ 본 연구에서 개발하는 V2X 네트웍 분산혼잡제어 기술은 도심에서 차량이 밀집된 운행 환경에서 발생할 수 있는 V2V 통신의 전송 지연증가와 신뢰도 감소 문제를 획기적으로 해결하여, 자율주행 3단계 이상에서 목표로 하는 도교통혼잡 시 저속 자율주행, 고속도로 자율주행을 지원할 수 있음.

○ 확보할 자율협력주행을 위한 분산혼잡제어 기술은 V2X 통신의 기반 기술로서 해당 분야에 대한 연구 주도권을 확보할 수 있음. 또한, 개발될 연구 결과물들은 C-V2X 표준화 회의에 제안하여 표준 채택이 가능할 정도의 높은 기술 수준을 가짐. 따라서, C-V2X 표준화에서 표준 기술로서 채택될 경우, 지적 재산권에 의한 로열티 수입 및 외국 로열티 공세에 효과적으로 대항할 수 있을 것으로 사료됨.

○ 도심 자율주행 시나리오를 수행하는 트래픽 시뮬레이터와 V2X 다계층 시뮬레이터가 연동된 자율협력주행 통합 시뮬레이션 플랫폼은 가상의 환경에서 협력자율주행의 성능을 모든 계층을 고려하여 통합 평가할 수 있으며, 이를 통해 필드 테스트로 인하여 발생할 수 있는 위험과 비용 문제를 해결할 수 있고 개발 기간을 상당히 감축시킬 수 있음.

○ 개발된 연구 결과물의 실현 및 실용화 가능성을 산업체 및 연구소와 공동으로 리뷰하고 검증하는 과정을 통해, 산업체 및 연구소에 의해 검증된 기술을 공통 특허 출원을 통해 기술 이전 추진 가능함. 이를 통해, 산업체로의 기술 이전하고 제품화를 통한 수익 창출이 가능함.

○ C-ITS를 위한 V2X 시스템은 WAVE에 기반한 시스템으로 대변되어왔으나, 3GPP에서 C-V2X 시스템 표준을 발표하고, 사용 주파수를 C-ITS 대역으로 선언하면서 해당 주파수에 대한 공유 문제가 이슈화되었음. 국내 5G 포럼에서 두 기술의 공존방안으로 C-V2X 및 WAVE에 각각 30MHz 폭을 할당하는 것을 제시하였으며, ETSI와 5GAA에서도 비슷한 공존방안을 제시함.

○ ITS 주파수 대역에서 일부 대역폭을 각각 다른 기술에 할당하는 경우 두 기술은 독립적으로 사용되며, 본 연구에서 개발될 V2X 네트웍 분산혼잡제어 기술은 WAVE와 5G가 결합되는 하이브리드 환경에서 LTE 및 5G 기반의 차량 통신을 대상으로 활용 가능함.

나. 기대효과

○ **연구성과물의 질적 우수성**

- 본 연구에서 확보할 협력자율주행을 위한 3GPP C-V2X 기반 혼잡제어기술은 국내외에서 아직 개발되지 않은 기초원천기술로서, 성공적으로 확보될 경우 협력자율주행 분야와 5G C-V2X 분야에서 주도권을 획득할 수 있음.
- 본 연구에서 개발하는 도심의 다양한 운행 환경 및 차량 밀도, 그리고 협력자율주행 서비스 종류에 따라 적합한 분산혼잡제어 알고리즘 최적화를 적응적으로 수행하는 기술은, 응용계층의 협력자율주행 서비스의 요구 성능에 따라 물리계층과 MAC 계층에서 운용되는 스케줄링 알고리즘을 적응적으로 최적화하는, 국내외 선행연구에서 찾을 수 없는 독창적인 개념임.
- 본 연구에서는 강화학습 기반의 Deep Q-network 기술을 이용하여 도심의 다양한 운행 환경 및 차량 밀도, 그리고 협력자율주행 서비스 종류에 따라 적합한 분산혼잡제어 알고리즘 최적화를 적응적으로 수행하는 기술을 개발하며, 강화학습 기반의 딥러닝 기술을 분산혼잡제어 분야에 적용하는 것은, 국내외 선행연구에서 찾을 수 없는 독창적인 연구임.

○ **기초원천기술 확보를 통한 기술적 기대효과**

- 국내외 자율협력주행을 위한 V2X 네트웍 혼잡제어기술은 개발되어 있지 않으며, WAVE 기반 C-ITS 안전서비스를 위한 혼잡제어기술에 머무르고 있음.
- 현재, 3GPP에서는 C-V2X 표준문서인 3GPP TS 36.331 및 TS 23.285에서, 혼잡제어를 수행할 수 있는 프레임웍만을 제시하고 있지만 구체적인 분산혼잡제어 알고리즘이 제시하지 않음.
- 또한 3GPP working document인 R1-1611594 및 R1-1702143에는 혼잡 제어를 줄일 수 있는 가능한 프레임웍과 프레임웍에 따른 성능 평가만을 정의하고 있음. 표준 문서와 마찬가지로 구체적인 분산혼잡제어 알고리즘에 대한 내용은 제시되지 않음.
- 따라서, 3GPP C-V2X 기반 혼잡제어기술 관련 연구는 국내외에서 아직까지 수행된 바가 없음.
- 본 연구에서 확보할 협력자율주행을 위한 3GPP C-V2X 기반 혼잡제어기술은 국내외에서 아직 개발되지 않은 기초원천기술로서, 성공적으로 확보될 경우 지속적으로 진화하고 있는 5G C-V2X 분야에서 주도권을 획득할 수 있음.
- 또한, 본 연구에서 개발하는 도심의 다양한 운행 환경 및 차량 밀도, 그리고 협력자율주행 서비스 종류에 따라 적합한 분산혼잡제어 알고리즘 최적화를 적응적으로 수행하는 기술은, 협력자율주행 구현을 위한 기초원천기술로서, 성공적으로 확보될 경우 협력자율주행 분야의 주도권을 획득할 수 있음.
- 특히, 강화학습 기반의 Deep Q-network 기술을 이용하여 도심의 다양한 운행 환경 및 차량 밀도, 그리고 협력자율주행 서비스 종류에 따라 적합한 분산혼잡제어 알고리즘 최적화를 적응적으로 수행하는 기술은, 향후 자율주행과 VANET 분야에 있어서 딥러닝 기술 적용을 선도할 수 있음.

○ **연구성과의 사회적 파급효과**

- 자율주행 3단계의 2020년 상용화를 지원할 수 있는 V2X 통신 기술은 WAVE와 C-V2X이지만, 자율주행에서 요구하는 성능을 만족하지 못하고 있음. 따라서, 본 연구에서 도심 자율주행 시에 발생하는 가장 난제인 혼잡상황에서의 무선자원 할당 문제를 해결하는 기술을 개발함으로서 자율주행 3단계를 구현하는데 핵심적인 기여를 할 수 있음.
- 미래 이동통신 기술을 이용한 다양한 형태의 서비스, 특히 자율협력주행 서비스에 대한 사용자 측면의 수요가 빠르게 확대되고 있으며, 이에 대한 기술적 공급에 기여할 수 있음.
- 자율협력주행 환경에서 혁신적인 혼잡 제어 기술을 제공함으로써 차량의 밀도가 높은 지역에서도 향상된 서비스 품질을 제공함으로써 국민 삶의 질 향상에 기여할 수 있음.
- V2X 기술은 미래 모바일 국가공공 기간 인프라로서 다양한 자율협력주행의 허브 역할을 수행할 수 있으며, 본 연구 개발을 통해 이에 기여할 수 있음.

붙임. 참고 문헌

[1] Campolo, Claudia, Antonella Molinaro, and Riccardo Scopigno. "Vehicular ad hoc Networks." Standards, Solutions, and Research (2015).

[2] Amjad, Zubair, et al. "Low latency v2x applications and network requirements: Performance evaluation." 2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). IEEE, 2018.

[3] Boban, Mate, et al. "Connected roads of the future: Use cases, requirements, and design considerations for vehicle-to-everything communications." IEEE vehicular technology magazine 13.3 (2018): 110-123.

[4] Khan, Irfan, and Jérôme Härri. "Integration challenges of facilities-layer DCC for heterogeneous V2X services." 2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). IEEE, 2018.

[5] ETSI TS 102 687 V1.1.1 ITS; Decentralized congestion control mechanisms for intelligent transport systems operating in the 5GHz range; Access layer part (2011)

[6] Kenney JB, Bansal G, Rohrs CE (2011) Limeric a linear message rate control algorithm for vehicular DSRC systems. In: 8th ACM international workshop on vehicular inter-networking, VANET'11, pp 21–30

[7] Toghi, Behrad, et al. "Analysis of distributed congestion control in cellular vehicle-to-everything networks." 2019 IEEE 90th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Fall). IEEE, 2019.

[8] Mansouri, Adel, Vincent Martinez, and Jérôme Härri. "A first investigation of congestion control for LTE-V2X mode 4." 2019 15th Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services (WONS). IEEE, 2019.

[9] R. S. Sutton and A. G. Barto, Reinforcement Learning: An Introduction, 2nd ed. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 2018.

[10] Huawei, HiSilicon. "R1-160284. DMRS enhancement of V2V." 3GPP TSG RAN WG1 Meeting. Vol. 84. 2016.

[11] Qualcomm Incorporated, "R1-1611594. Congestion control for V2V," presented at 3GPP TSG RAN WG1 Meeting 87, Reno, NV, Nov. 2016.

[12] On-Board System Requirements for V2V Safety Communications, Standard SAE J2945/1, 2016.

[13] Kang, Byungjun, Sunghoon Jung, and Saewoong Bahk. "Sensing-based power adaptation for cellular v2x mode 4." 2018 IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN). IEEE, 2018.

[14] 3GPP TR 36.885 v14.0.0., Study on LTE-based V2X Services, 2016

[15] ATTAP, What are CV and AV?, Available: https://attap.umd.edu/cvs-and-avs/what-are-cvs-and-avs

[16] 3GPP, Path towards 5G for the automotive sector, Available: https://www.3gpp.org/ftp/Information/presentations/presentations_2018/2018_10_17_tokyo/presentations/2018_1017_3GPP%20Summit_07_5GAA_FLAMENT.pdf

[17] 5GCAR: Demonstrations, Available: http://downloads.viscoda.com/research/2019-06-EuCNC/2019_EuCNC-UseCaseRepresentationsOfConnectedAndAutomatedDriving-poster.pdf

[18]Qualcomm, 5G NR based C-V2X, Available: https://www.qualcomm.com/media/documents/files/5g-nr-based-c-v2x-presentation.pdf

[19] 국토교통부, 회전교차로 설계지침(2014.12)

[20] R. Schubert, E. Richter, G. Wanielik, "Comparison and evaluation of advanced motion models for vehicle tracking," 2008 11th International Conference on Information Fusion, 2008

[21] 속도에 따른 정지거리, Available: https://safetyroad.tistory.com/entry/자동차-용어상식정지거리-공주거리-제동거리-안전거리

[22] 자율주행 트럭 군집주행 동향, Available: https://www.lotis.or.kr/tia03v.do?cn_id=2018101500012&cn_type_cd=TIA&CN

[23] PSA and Ministry of Transport, Available: https://www.globalpsa.com/psa-to-start-truck-platooning-trials-in-singapore/

[24] Pure Pursuit 알고리즘 1, Available: https://dingyan89.medium.com/three-methods-of-vehicle-lateral-control-pure-pursuit-stanley-and-mpc-db8cc1d32081

[25] Pure Pursuit 알고리즘 2, Available: https://kr.mathworks.com/help/robotics/ug/pure-pursuit-controller.html

[26] A. Bazzi, "Congestion control mechanisms in IEEE 802.11p and sidelink C-V2X," 2019 53rd Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers, pp. 1125-1130, 2019

[27] 3GPP, "TS 36.213 Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures (v14.3.0, Release 14)," 3GPP, Tech. Rep., 2017

[28] 3GPP, "TS 36.321 Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Medium Access Control (MAC)

protocol specification (v14.3.0, Release 14),” 3GPP, Tech. Rep., 2017
[29] Qualcomm, “R1-1611594 congestion control for v2v,” 3GPP TSG RAN1-87, Tech. Rep., 2016
[30] 양인철, 전우훈, 이향미, “자율주행을 위한 동적지도 정보 제공에 관한 연구,” 한국ITS학회 논문지, 16(6), pp. 208-218, 2017
[31] S. Chen, J. Hu, Y. Shi, L. Zhao, W. Li, "A vision of C-V2X: technologies, field testing and challenges with chinese development," IEEE Internet of Things Journal, vol. 7, no. 5, pp. 3872-3881, 2020

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.

2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.

3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.