

자율 군집 주행을 위한
WAVE 표준 기반 응용 프로토콜원천 기술 개발
최종보고서

2019

국
토
교
통
과
학
기
술
진
흥
원

자율 군집 주행을 위한 군집 행동 모델 및 WAVE 표준 기반 응용 프로토콜 원천 기술 개발 최종보고서

2019

2019. 6.

주관연구기관 / 고려대학교 산학협력단

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통과학기술진흥원 귀하

‘자율 군집 주행을 위한 군집 행동 모델 및 WAVE 표준 기반 응용 프로토콜 원천 기술 개발’
(연구개발 기간 : 2017. 06. 30. ~ 2019. 03. 30) 과제의 최종보고서를 제출합니다.

2019. 6.

주관연구기관명 : 고려대학교 산학협력단 (대표자) 허 준



주관연구기관책임자: 김효곤

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	18CTAP-C133064-02	해당 단계 연구 기간	2017-06-30 - 2019-03-30	단계구분	1/1
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명				
연구과제명	대과제명				
	세부과제명	자율 군집 주행을 위한 군집 행동 모델 및 WAVE 표준 기반 응용 프로토콜 원천 기술 개발			
연구책임자	김효곤	해당단계 참여연구원 수	총: 14 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: 14 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	고려대학교 산학협력단			참여기업명	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:	
※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음					
연구개발성과의 보안등급 및 사유	일반(보안과제 아님)				

9대 성과 등록·기탁번호

구분	논문	특허
등록·기탁 번호	https://doi.org/10.3390/s18124388 https://doi.org/10.1109/lcomm.2018.2889666 http://dx.doi.org/10.1049/el.2018.6750	10-2018-0041646 (출원) 10-1969674-0000 (등록)

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 170

요약문

연구의 목적 및 내용	우리 과제는 독립 자율주행 기능을 최대한 활용하는 군집 주행 알고리즘과 이를 보조하기 위한 표준화된 응용 프로토콜 개발을 목적으로 함 1차 연도에서는 최소한의 제약과 최대한의 자율을 보장하는 flocking 행동 모델 기반의 자율 군집 주행을 연구하였으며 대표적으로 기존의 분산 행동 모델의 최소한의 제약 (응집, 분리, 정렬)을 자율 군집 주행 환경에 맞게 도입하고 V2X 통신을 적용한 연구를 진행하였음. 2차 연도에서는 자율 군집 주행을 위한 V2X 통신상의 WAVE 표준 기반 응용 프로토콜 및 서비스를 연구하였으며 대표적으로 자율 군집 주행시 전방 영상 등과 같이 군집이 공유할 내용을 효율적으로 전달하는 기법인 의사-브로드캐스트(pseudo-broadcast)를 연구하였음. 또한 5G 기반 C-V2X 표준 상의 알고리즘을 개선, 5G 기반 자율 군집 주행에 적용하는 연구를 하였음				
연구개발성과	우리 연구에서 목표로 했던 것보다 SCI급 학술지에 추가로 2건(1건 게재 예정 포함)을 게재하고 성과 합계 점수로는 9점을 추가 달성함. 특히 게재 예정인 논문 1건은 매우 높은 Impact Factor (IF = 10.435)의 학술지에 accept 되었음 1차 연도 연구 성과로는 도로 위의 급변하는 교통 상황에 신속하고 유연하게 대응할 수 있도록 하는 flocking 행동 모델 기반 자율 군집 주행 알고리즘을 연구개발하여 논문 게재 1건을 달성하였음 2차 연도 연구 성과로는 자율 군집 주행을 위한 V2X 통신상의 WAVE 표준 기반 응용 프로토콜을 연구개발하여 특허 출원 1건, 특허 등록 1건, 논문 게재 1건을 달성하였음. 그 외에도 5G 표준화에 대응하여 C-V2X 표준 상의 알고리즘을 개선, 5G 기반 자율 군집 주행에 적용할 수 있도록 연구개발한 결과 논문 게재 1건을 달성하였음. 논문과 특허 외에도 국외 학술회의 발표 4건과 국내 학술회의 발표 2건을 달성하였음				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	우리 연구는 최소한의 제약과 최대한의 자율을 보장하는 flocking 행동 모델 기반의 자율 군집 주행 연구를 통해 자율 주행 차량의 자율성을 높임으로써 고도의 독립 자율주행 지능을 활용할 수 있도록 할 것임. 무엇보다도 기존에 다뤄지지 않은 자율 군집 주행을 위한 V2X 통신의 새로운 프로토콜 설계 및 표준화 기여를 통해 유럽, 미국이 선도하는 ITS 기술 수준에 국내의 ITS 기술이 대등하게 또는 그보다 앞선 위치에 설 수 있도록 할 수 있음. 또한 자율 군집 주행과 V2X 통신 기술 사용에 있어 중요하게 여겨지는 데이터 유효성 검사를 통해 신뢰 있는 통신을 지향함. 이 연구를 통해 자율 군집 주행을 통한 연료 소모의 감소, 전문 인력 필요의 감소, 도로 교통 효율성 증진은 사회적, 경제적 비용을 절감할 수 있도록 하며 배기가스 감소 등을 통한 대기 오염 문제, 도로 교통 안전성 증대에 따른 교통사고 감소 등의 사회적 문제 해결에 기여할 수 있을 것임				
국문핵심어 (5개 이내)	자율 군집 주행	V2X 통신	Flocking 행동모델	응용 프로토콜	표준 기반
영문핵심어 (5개 이내)	Autonomous Platooning	V2X communications	Flocking behavioral model	Application protocol	Standard-based

※ 국문으로 작성(영문 핵심어 제외)

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요	5
가. 연구개발의 개요 (목적 및 필요성)	5
나. 연구개발 대상의 국내외 현황	8
다. 연구개발의 중요성	14
라. 연구개발의 목표 및 범위	15
2. 연구수행내용 및 성과	17
가. 접근 방법	17
나. 연구 내용	20
다. 연구 개발 성과	152
라. 연구의 기술적, 경제적 성과	154
마. 연구 성과의 우수성	157
3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	159
가. 목표	159
나. 목표 달성여부	160
다. 목표 미달성 시 원인(사유) 및 차후대책(후속연구의 필요성 등)	162
4. 연구개발성과의 활용 계획 등	163
가. 추가 연구의 필요성	163
나. 추가 연구의 필요성	163
다. 타 연구에의 응용	166
라. 관련 산업에의 기술 이전	166
붙임. 참고 문헌	168

<별첨> 주관연구기관의 자체평가 의견서

1. 연구개발과제의 개요

가. 연구개발의 개요 (목적 및 필요성)

(1) 배경: 자율 주행 차량 및 자율 군집 주행 기술의 급격한 발전

- 전자기술의 발달로 인해, 자동차는 내연기관을 포함하는 기계장치에서 많은 수의 micro controller unit (MCU)를 이용해 전자적으로 기능을 구동하는 전자기기로 진화 중이며 부품 간의 전자제어를 통해 효율적인 주행이 가능하도록 개발되어 왔음
- MCU와 카메라, 레이더 (RADAR), 라이다 (LiDAR) 센서 등을 이용한 전방 충돌 경고 (Forward Collision Warning, FCW), 차선 이탈 경고 (Lane Departure Warning System, LDWS) 등과 같은 안전 주행을 위한 경고장치 등이 개발되었으며 주행 자체를 돕는 적응형 크루즈 컨트롤 (Adaptive Cruise Control, ACC), 차선 유지 보조 시스템 (Lane Keeping Assistance System, LKAS)등과 첨단 운전자 지원 시스템 (Advanced Driver Assistance System, ADAS)는 이미 보급되고 있음
- 특히 ACC와 LKAS와 같은 기능은 자동으로 앞차와의 간격을 조절하고 차선을 유지하므로 주행 기능이 자동화된 2단계 자율 주행을 가능하게 함 (그림 1)

단계	정의	특징	책임소재	운전자 역할
0	No automation	운전자 직접 주행	운전자	• 모든 기능 직접 조작
1	Function-specific automation	특정기능 자동화	운전자	• 타 기능 직접 조작 및 상황 주시
2	Combined Function automation	통합기능 자동화	운전자	• 운전상황 주시 (독서, 휴식 불가능)
3	Limited self-driving automation	제한적 자율주행	차량	• 독서, 휴식 가능 • 필요시 운전자 개입
4	Full self-driving automation	완전 자율주행	차량	• 완전 자율주행

그림 1. 자율 주행 차량 기술단계 (NHTSA)

- 학계, 산업계에서는 2단계 자율 주행을 활용하여 여러 대의 차량이 군집을 이루어 주행하는 자율 군집 주행을 함으로써 연비 효율 및 주행 안전성을 향상시키는 연구를 진행 중임
- 카메라, 레이더, 라이다 등의 센서를 이용하여 차량과 차량의 간격을 법정 안전 거리보다 현저히 좁히면서도 안전한 주행을 가능하게 하는 군집 주행을 함으로써 연비를 높이고 주행 안전성을 향상시키는 연구
- 이러한 연구에도 불구하고 ADAS를 이용한 2단계 자율 주행은 주변 주행 환경의 파악 능력이 센서의 성능에 제약 받으므로 운전자 보호 및 주행 효율 향상을 위한 부드러운 차량 간 연동에 한계가 있음. 특히 타 차량의 상태 정보는 센서로 인지가 가능하나, 차량이 상태 변경을 하려는 의도 자체는 인지할 수 없으므로

로 미리 대처하기 어려움

- 제한된 주변 환경 인식의 한계를 뛰어넘기 위해, 최근 미국에서 법안이 발의되어 신규 상용차에 탑재될 예정인 Vehicle-to-Everything (V2X) 통신을 이용하여 차량의 상태를 공유하고, ADAS보다 능동적으로 도로 상황에 대응하는 제한적/완전 자율주행 연구가 진행되고 있음
 - 미국의 IEEE Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE)나 유럽 ETSI의 Intelligent Transportation System (ITS)-G5와 같이 V2X 통신을 위한 프로토콜의 표준화가 완료된 상태임
 - 미국, 유럽, 일본 등 대부분의 상용차 생산 국가는 V2X 통신을 접목한 자율주행을 위한 연구 및 실차 실험을 진행 중임
 - 유럽의 Grand Cooperative Driving Challenge (GCDC)는 2016년 두 번째 대회를 열고 ADAS 기능에 V2X 통신을 추가함으로써 차량 간에 메시지를 주고받아 협력적으로 주행하는 데모를 선보인 바 있음

(2) 문제: 독립 자율주행 기능을 최대한 활용하는 군집 주행 알고리즘과 이를 보조하기 위한 표준화된 응용 프로토콜의 부재

- 현재까지의 자율 군집 주행 알고리즘은 실제 차량 주행 환경에 맞지 않는 과도한 제약으로 인해 이론적인 수준에 불과하며 자율 주행 기능을 최대한 활용하지 못함
 - 군집의 유연하고 안정적인 이동을 위해 flocking 행동 모델을 접목시키는 연구가 시도된 바 있으나 실제 환경에 반영하기 어려우며 특히 도로 상에서 1차원의 좁은 차선을 종적으로 행동하는 군집 주행에 적용하기에는 제약 조건이 과도함
 - 또한 자율 주행은 차량 제조사들마다 다른 종류의 기능과 알고리즘을 사용하여 동작하므로 방대하고 세세한 제약 조건을 강제하기 어려움
 - 최소한의 필수적인 제약 조건을 요구하는 행동 모델을 사용함으로써 자율 주행 차량의 자율성을 최대한 활용하는 연구가 필요함
- 표준화된 응용 계층의 프로토콜 부재로 인해 자율 군집 주행의 현실적인 활용이 어려움
 - 자율 군집 주행 시 군집의 형성, 합류, 이동, 이탈 등의 전 과정을 수행하기 위해서는 차량 간에 통신을 이용해 의도를 공유하고 협력을 위한 프로토콜이 필수적임
 - 그러나 완성차 회사들 간의 기술력 경쟁으로 인해 개별 차량의 자율 주행 능력은 급속도로 향상된데 반해 표준화된 자율 군집 주행 프로토콜의 부재로 인해 타사 차량과 협력하여 주행하는 방법에 대한 연구는 제자리걸음 중임
 - WAVE나 ITS-G5와 같이 차량 간 통신을 위한 프로토콜의 표준화는 완료되었음에도 불구하고 자율 군집 주행을 위한 V2X 통신상의 응용 프로토콜 스택이 만들어 지지 않는 상태

(3) 제안의 요점

- 자연에서 영감을 받은 flocking 행동 모델을 기반으로 고성능 자율 주행 기술을 갖춘 차량이 최소한의 제약 조건만으로 최대한의 자율을 보장받으면서 자율 군집 주행하는 연구를 수행할 것임
 - 차량의 독립 자율주행은 현재 고도화된 센싱 기술을 통해 이미 작동하고 있음. 기존의 flocking 행동 모델을 과도하게 세세한 조건들로 구현하면 고도의 독립 자율주행을 가진 차량에 적용하면 각 차량의 지능을 활용하지 못하고 자유로운 주행을 오히려 억제할 가능성이 있음
 - 본 연구에서는 차량의 자유로운 군집 주행에 이 flocking 행동 모델을 적용하되 최대한의 자율을 보장하면서도 최소한의 제약조건만으로 군집을 이루도록 하는 연구를 진행함

- 현재 여러 회사들이 개발하고 있는 우수한 성능의 자율 주행 차량이 다 같이 군집 주행을 할 수 있도록 하는 표준화된 V2X 통신 응용프로토콜 및 서비스를 개발할 것임
 - 자율 주행 기술은 자동차 업계의 기술 경쟁을 통해 빠르게 발전하고 있으나, 업체마다 사용하는 기능과 알고리즘이 다르기 때문에 합의된 기술을 사용하기 어려움
 - 그러나 자율 주행 차량이 더 높은 안전성을 보장하고 자유로운 주행을 위해서는 타 차량과 V2X 통신을 통해 정보를 교환하여 위험도를 줄이는 것이 필수적이며 자율 군집 주행에서는 그 필요성이 극대화됨에도 불구하고 자율 군집 주행을 위한 표준화된 응용 프로토콜이 부재함
 - 자율 군집 주行的 현실화를 위해서는 이 난관을 반드시 헤쳐야 하며 본 연구에서는 V2X 통신상의 자율 군집 주행을 위한 WAVE 기반 응용 프로토콜 및 서비스를 개발하여 제안함으로써 차량 제조사에 관계없이 안전하고 주행 효율이 높은 자율 군집 주행이 가능하게 할 것임

- V2X 통신의 신뢰성 향상 및 보안성 강화를 위한 연구를 수행할 것임
 - 카메라, 레이다, 라이다 등의 센서는 Line of Sight (LoS)에 차량 또는 물체가 위치해야 인식되는 단점으로 인해 날씨, 열악한 도로환경, 장애물 등에 의한 인식 문제가 발생할 수 있으며 이것의 해결을 위해 1 km까지 통신이 가능하며 Non-Line of Sight (NLoS)상황에서도 정보 교환이 용이한 V2X 통신이 사용됨
 - 그러나 V2X 통신도 여전히 차량 혼잡 상황이나, 도로 구조물이 복잡한 환경에서는 수신 감도가 떨어지고 연결이 절체되는 상황이 발생할 수 있으므로 이것에 대비한 신뢰도 향상 연구가 반드시 필요함
 - 또한 V2X 통신 프로토콜이 제공하는 보안 기능이 존재함에도 불구하고 여전히 공격 가능한 취약점을 찾아 개선하고, 자율 군집 주행을 위해 실행되는 정보 교환으로 인해 발생하는 개인 정보 노출을 막는 연구도 진행할 것임

나. 연구개발 대상의 국내외 현황

(1) 국내 연구 현황

- 1998년 자동차부품연구원에서 10 m간격으로 4 대의 차량이 최고 시속 80 km로 달려 세계에서 네 번째로 군집주행에 성공하였으나, flocking 행동 모델이나 WAVE 표준 기반 V2X 통신을 기반으로 한 군집주행은 아니었음
- 한양대에서 군집 주행을 위한 통신 기술에 대한 연구 (과제명: WAVE 기반 차량 군집 제어 및 통신을 위한 V2X 핵심 기술 연구)를 한국연구재단의 지원을 받아 2011년부터 3년간 진행한 바 있으나 아래와 같이 연구 분야에 있어서 제한점이 있음
 - V2X 통신상에서 메시지의 전달률을 높이기 위한 메시지 전송 스케줄링과 실시간 정보를 이용해 성능 평가하기 위한 시뮬레이션 프레임워크 연구와 같이 V2X 통신에 집중된 연구를 하여, 자율 군집 주행을 위한 군집의 생성, 인증, 해제 등에 이르는 전 과정을 관리하는 응용 프로토콜에 대한 연구가 미흡
- 자동차부품연구원에서는 자율주행의 한 분야로서 군집주행 기술을 연구 중이고 2013년 무인 자율주행 자동차 경진대회에 참가해 기술력을 선보였으나 WAVE 표준 기반 V2X 통신의 사용을 고려하지는 않았음
 - 자동차부품연구원은 디지털 맵과 레이저스캐너 정보를 융합하여 차간 거리 20 m를 유지하고 최고 속도 시속 60km로 이동하는 자율군집주행을 다음 그림과 같이 시연함
 - WAVE 표준 기반 V2X 통신을 사용하여 군집의 생성, 유지, 해제 등의 군집 주행 전반을 관리하는 프로토콜과 같은 장치가 부재하였음



그림 2. 자동차부품연구소의 자율군집주행 시연

- 한국전자통신연구원, 전자부품연구원, 만도 등 차량 관련 학계와 업계는 차량의 안전지원과 자율 협력 주행을 위한 실시간 협력제어 통신/보안 기술 개발 및 핵심 칩 구현을 목표로 하는 프로젝트를 2016년까지 4년간 진행하였으나 다음과 같은

부분에 대한 연구가 미흡함

- 협력주행의 가장 대표적인 형태인 군집주행을 실시간 구현해 시연하고 성능 시뮬레이션과 프로토타입 모듈의 설계 및 개발과 System on Chip (SoC) 시제품 개발을 할 계획이었으나 시연 결과 및 시제품 개발 결과에 대한 정보를 얻을 수 없음
- 생명과 직접 연관될 수 있는 군집 주행에서의 보안 중요성이 크게 부각되어 WAVE 표준의 보안적인 요소를 적용하는 연구를 하여 각 메시지 자체에 대한 보안성은 향상되었으나, 자율 군집 주행 전반에 걸쳐 고장 감내 (fault tolerance) 등을 포함하는 신뢰성 및 보안성에 대한 연구는 미흡함

○ 국토교통부와 국토교통과학기술진흥원은 자율주행 분야의 첫 국가 연구개발 과제인 ‘스마트 자율협력주행 도로시스템 개발 사업’을 국고 260억 원을 2015년부터 2020년까지 5년간 투입하는데 이는 인프라 및 관련 법, 제도를 위한 연구개발 과제임

- 효과적인 자율 협력 주행을 위한 알고리즘이나 프로토콜 등과 같은 소프트웨어에 대한 투자라기보다는 차량-도로-차량 간 통신 기반 자율주행 도로 인프라 구축과 관련 법, 제도 정비에 위한 투자임
- 실제 자율주행차가 도로를 달리는 실증사업도 포함되었고, 과제 결과물인 2단계 부분 자율주행기술이 2018년 평창 동계올림픽에서 시연될 예정임

○ 국토교통부 주도로 이뤄지고 있는 차세대 ITS (Cooperative-Intelligent Transport Systems, C-ITS) 사업에서는 군집주행을 포함하는 다양한 서비스가 가능하도록 일부 고속도로 구간에 인프라를 2017년 4월까지 구축할 예정임

- C-ITS 단말기를 장착한 차량에게 도로위험구간 정보제공, 차량 긴급 상황 경고, 노면기상정보 제공, 우회전 안전운행 지원, 보행자 충돌방지 경고 등 15개 서비스를 제공하기 위한 인프라를 구축하는데 초점이 맞추어져 있음



그림 3. C-ITS 사업에서 추진 중인 V2X 통신 용 고속도로 인프라 구축 예시

○ 경기도에 자율주행 차 실험도시 (K-City)를 2019년 12월까지 구축하고 안정성 평가기술을 개발할 계획인데, 평가하는 기술 및 인프라 확보를 목적으로 함

- 도심부, 자율주차시설, 자동차전용도로, 교외도로 등으로 구성될 예정이며 세계 최초 자율차 테스트베드인 미국 미시건대 엠시티 (M-City)를 벤치마킹하기로 함

- 자동차전용도로 기반 3단계 자율주행, 자율주차, 자율주행 기능 고장 시 상황별 안정성, 해킹 등에 대비한 자율차 통신시스템 등의 안전성을 평가하는 기술을 확보하는 것을 목표로 함

○ 전라북도는 2018년부터 2022년까지 총 3000억 원을 투입하여 상용차 자율주행 기반 글로벌 전진기지 조성사업을 추진할 계획으로 지역 사회 활성화를 위한 자율주행 인프라 구축을 위한 시도임

- 구체적으로 새만금 산업단지를 중심으로 한 글로벌 부품업체 집적단지 조성, 상용차 자율주행기반 기술 개발 지원, 실증 및 연구 인프라 구축 등을 할 예정임
- 제품 설계부터 개발, 평가 및 실증, 사업화까지 한 지역에서 일괄 처리하려는 의도임

○ 군집의 생성, 해제, 병합 등의 군집 주행 제어를 위한 연구에는 다음과 같은 결과물이 있으나 본 연구가 지향하는 바와 방향이 다름

- 효율적인 군집주행 제어를 위해 관련 정보를 각 차량이 송수신하고 군집정보의 생성 및 해제를 포함하는 일련의 처리 과정을 제안하였으나 이는 군집 주행 중 충전이 필요한 차량과 충전을 제공할 수 있는 차량을 검출하고 해당 차량들의 위치를 인접하게 해주는 방법으로써 자율 군집 주행에서 전기차와 전기차를 충전 가능한 차량이 함께 달리는 경우에 충전 서비스 제공을 위한 상황에 국한된 특허임 (한국과학기술원, 2010년 등록 특허, ‘군집주행 제어 시스템 및 방법’)
- 바이모달 트램 군집 주행 시, 각 차량으로부터 받은 정보가 아닌 Adaptive Cruise Control (ACC) 정보를 이용하여 군집 크기 및 군집 내 위치를 파악하고, 군집을 합치거나 쪼갤 수 있음을 보여주었으나 이는 바이모달 트램의 군집 주행으로 제한되고, 신뢰성 및 보안성 향상을 위한 요소가 고려되지 않아 미흡한 점이 있음 (한양대, 2013년 한국철도학회 추계학술대회, ‘바이모달 트램 군집주행의 천이기동 시나리오를 위한 통신 기반 제어 알고리즘 개발’)
- 바이모달 트램 군집 주행 시, 차량 간 통신을 통해 선두 트램의 속도와 가속도, 거리 정보를 제공하여 기존의 Model Free Cruise Control (MFCC) 알고리즘을 개선한 새로운 제어 알고리즘을 제안하였으나 바이모달 트램의 군집 주행으로 제한되고, 군집의 생성, 유지, 해제 등 전반적인 군집 주행의 관리가 아닌 군집 주행 시 속도 결정을 위한 알고리즘에 국한됨 (한양대, 2013년 한국철도학회 추계학술대회, ‘바이모달 트램 군집주행 안정성 및 성능향상을 위한 통신 기반 제어 알고리즘 개발’)
- 군집 주행 시, 새로운 군집을 생성하는 과정, 해당 서비스에 들어오려는 차량을 인증하는 과정 및 인증된 정보를 들어오려는 차량에게 다시 전송하는 과정을 제안하였으나 이는 군집 주행에 참여하려는 차량의 인증 과정만을 언급하고 있고, WAVE 표준 기반 통신 방법의 미사용으로 수많은 차량 및 부품 제조사에 제품 생산에 복잡도를 증가시킬 수 있음 (한국전자통신연구원, 2014년 등록 특허, ‘이동체의 군집 주행 서비스 인증 방법 및 그 장치’)
- 군집 주행 서비스를 위한 그래픽 유저 인터페이스. (Graphic User Interface,

GUI)를 제공하고 리더 차량에 서비스 참여 요청 메시지를 전달하고 다른 차량들로부터 메시지를 수신하는 방법을 제안하였으나 군집의 생성과 해체 등에 대해서는 다루지 않고 이미 생성된 군집 내에서 차량들 간의 통신에 대한 방법에 대한 것이고, 보안성 및 신뢰성에 대해서도 다루지 않음 (한국전자통신연구원, 2014년 등록 특허, ‘군집 차량들간 협력 주행 장치 및 그 방법’)

- 무인 군집 주행을 위한 알고리즘 및 군집주행 서비스 요구사항에 대해 WAVE 표준 기반 통신 시스템 성능의 분석에 관한 연구는 다음과 같은 것들이 있으나 본 연구가 지향하는 바가 다르고 범위가 제한적임
 - 리더 차량에 운전자가 탑승하는 일반적인 군집 주행과는 달리 다수의 무인차량이 군집 주행 시, 모델 예측 제어 기법을 통해 선두 차량의 후미를 기 정의된 거리를 유지하면서 쫓아가는 알고리즘을 제안하였으나 WAVE 표준 기반 V2X 통신을 고려하지 않았고, 3 대의 차량을 활용하여 타당성을 검증하였기 때문에 더 많은 차량에 대한 검증이 추가적으로 요구됨 (국방과학연구소, 2016년 한국자동차공학회 추계학술대회 및 전시회, ‘다수 무인차량을 활용한 군집주행’)
 - WAVE 표준 기반 통신시스템의 성능이 군집 주행 서비스의 요구사항을 충족시키는 지 패킷 에러율과 평균 지연시간을 분석하여 알아보았으나 군집 주행 차량을 최대 5 대로 제한하고 일반 차량은 최대 6 대로 설정하여 무선 통신 채널의 혼잡도를 가정하여 군집 주행 서비스 요구사항의 범위가 제한적임 (한국전자통신연구소, 2017년 한국ITS학회 논문지, ‘고속도로 환경에서 군집주행 서비스 요구사항에 대한 WAVE 통신 시스템 성능 분석’)

(2) 국외 연구 현황

- 미국의 Partners for Advanced Transportation Technology (PATH)는 새로운 인프라의 최소 구축을 통해 고속 도로 수용량의 극대화를 통한 여행 수요 증가를 목적으로 시작된 자율 군집 주행 연구 프로젝트이며 많은 모델링과 시뮬레이션을 통해 각각의 자율 주행보다 군집 주행이 나음을 보임
 - PATH의 고속 도로 수용량에 대한 운동학적 연구는 10대의 차량이 군집 주행을 한다면 현재의 수용량보다 2, 3배 이상 증가시킬 수 있을 것을 기대함
 - 또한 군집 간의 거리는 충돌 상황이 일어나지 않을 정도의 거리를 보장해야 하며 교통사고를 유발할 수 있는 운전자 에러의 가능성을 제거하고 효율성을 극대화하기 위해 모든 차량이 자율 주행임을 가정함
 - 1994년 고속 도로 주행 속도로 4 m의 차간 간격을 유지하는 4대의 차량이 종 이동 실험을 최초로 진행했으며 National Automated Highway System Consortium (NAHSC) 데모를 위해 1997년에는 총 8대 차량의 자율 군집 주행을 개발함
 - 2012년에는 대형 트럭에 집중한 군집 주행을 연구하였으며 이를 통한 공기 저항 감소 및 에너지 절약을 집중 연구함
 - 본 프로젝트는 일렬의 군집 형태의 영향을 연구하였고, V2X 통신은 센서 정보를 앞으로 전달하는 용도로만 사용함

- 유럽의 Safe Road Trains for the Environment (SARTRE)는 전용차로 등의 인프라 변경 없이 실제 사용되는 공용 도로에서 군집 주행에 대한 솔루션의 개발 및 통합을 위한 유럽 위원회 지원 프로젝트이며 연료 소모의 감소와 안정성, 교통 효율 증진 및 사용자의 편의 등을 얻고자 함
 - SARTRE에서는 군집을 직접 맨 앞에서 주행하는 대형 차량인 리더와 이를 따르는 차량의 집합으로 정의하며 군집 내 차량은 트럭이나 승용차가 될 수 있고 횡/종 방향에 맞춰 자동적으로 리더를 따라감
 - ITS-G5 기반의 V2V 통신이 사용되며 이는 차량 간 센싱, 작동 등의 정보를 전송하고 공유함으로써 군집 제어 알고리즘에 사용되며 군집 내 다른 차량으로부터 간섭을 줄이고 공기 역학적 특성 개선을 위해 일정한 간격을 유지하는데 사용됨
 - V2V 통신을 통해 직접적으로 데이터를 주고받을 수 있으며 이를 통해 센서 사용의 한계인 에러 축적, 지연 및 앞 차에 한정된 정보 제공 등을 극복할 수 있음
 - 본 프로젝트는 V2X 통신을 센싱, 작동 정보의 전송에만 사용하였으며 별도의 표준화는 고려하지 않음

- 유럽의 Grand Cooperative Driving Challenge (GCDC)에서는 센서 퓨전과 차량 통신의 조합을 기반으로 협력 자율 주행의 개발, 통합 및 데모의 실현을 목표로 2011년 도심지와 고속도로 주행 시나리오에서 많은 차량의 군집 주행을 직접 보임
 - 차량의 종 이동 움직임과 앞차와의 거리 등을 자동으로 조절하기 위해 주변 차량들 간에 차량 정보와 로컬 센서를 통한 센서 값을 주고받음
 - GCDC에 참가한 팀은 제조사에 국한되지 않으며 대형차부터 승용차까지 다양하며 다른 센서 기술을 사용할 수 있지만 주최 측의 전제 조건을 준수해야함
 - 군집 내 모든 차량은 종 이동에 대해 자동적이며 리더의 역할은 언제든지 바뀔 수 있음
 - 그림 4와 같이, 2016년에는 새롭게 표준화된 차량 통신 표준을 통해 군집 간 합류 (merging) 프로토콜 및 교차로 상황 시 협력 프로토콜 등을 개발하고 데모를 통해 이를 보임
 - 본 프로젝트는 V2X 통신을 이용해 군집 제어를 위한 프로토콜 등을 개발하였으나 주최 측에 의해 제한적인 요소를 갖고 있으며 표준화된 프로토콜의 서비스 제공 및 관리가 미흡함



그림 4. 2016년 GCDC 실제 데모

- 스웨덴의 SCANIA Platooning은 연료 소모 감소 및 환경오염 해소를 위한 목적으로 만들어진 프로젝트이며 SCANIA Platooning의 주된 관심사는 고속도로에서 연료 소모를 최소화하는 대형 트럭의 군집 주행에 있음
 - SCANIA의 이러한 관심은 스웨덴 정부로부터 지원을 받는 두 개의 프로젝트로부터 확인할 수 있음
 - 하나는 Distributed Control of a Heavy Duty Vehicle Platoon으로 SCANIA와 The Royal Institute of Technology (KTH)의 협력 프로젝트이며 군집 주행 상황에서 안전을 위협하지 않으면서 군집 내 단일 차량을 효율적으로 제어하는 방법 제시를 목적으로 함
 - 각 차량이 자신의 레이더, 라이다 또는 카메라 등의 로컬 센서에 따라 얻어지는 정보와 V2V 통신을 통한 정보를 이용해 분산 제어를 하게 됨
 - 다른 하나는 iQFleet으로 KTH, Swedish National Road and Transport Research Institute (VTI), The Swedish Transport Administration (Trafikverket)의 협력 프로젝트이며 도로 내 사용자, 토폴로지, 인프라와 관련해 어떻게 군집이 제어되어야 하는지를 중점으로 하며 도로 상황에 따른 군집의 주행 및 경로 지원 기술 개발을 목표로 함
 - 군집 주행을 실제 도로에서 테스트하며 스웨덴 내 두 개의 도시에 있는 제조 공장 간 상품 운송을 통해 이를 검증하고자 하였으며 연료 소모의 가능성 탐색, 군집 외 차량들과의 상호 작용 등의 검증을 목표로 함
 - 첫 번째 단계에서, 군집은 기존의 레이더를 이용한 Adaptive Cruise Control (ACC)을 사용하였고 트럭 간 거리는 40~60 m를 유지하였음
 - 두 번째 단계에서는 V2V 통신을 이용하여 더 짧은 차간 거리를 유지할 수 있도록 했으며 운전자가 원한다면 해당 거리를 더 줄일 수 있음
 - SCANIA는 일본의 TOYOTA와 2019년 트럭 군집 주행 프로젝트를 진행할 예정임
 - 본 프로젝트는 트럭의 군집 주행에 집중돼 있으며 V2X 통신을 이용한 별도의 서비스 제공이나 관리가 아닌 정보 공유를 통한 분산 제어의 측면을 다룸
- 독일의 KONVOI는 2005년부터 2009년까지 공기 역학적 특성 향상을 위해 대형 트럭이 좁은 간격을 유지하며 자율 군집 주행하는 것을 목적으로 하는 프로젝트이며 V2V 통신을 이용해 좁은 간격 유지를 통한 교통 흐름의 개선과 효율적인

도로 활용을 목적으로 함

- V2V 통신뿐 아니라 카메라, 레이더, 라이다 등의 센서를 함께 사용하였음
- 2009년 4대의 MAN, IVECO 제조사의 대형 트럭은 10 m 간격으로 실제 도로 교통 상황에서 군집 주행을 성공하였음
- 전체 군집은 3100 km를 군집 운행하였고 이는 실제 도로의 세계 최초 군집 주행이었음
- 본 프로젝트는 차간 거리 조절을 통한 공기 역학 특성 연구를 집중하였으며 자율 군집 주행 알고리즘을 통한 자율성 증진 등은 고려하지 않음

○ 일본의 Energy ITS는 2008년부터 일본 경제 산업부로부터 지원 받은 국가 ITS 프로젝트이며 자율 주행 트럭 군집 주행과 에너지 절감 측면의 ITS 효과성 검증 방식에 대해 연구하였으며 ITS 기술을 통한 에너지 절감과 세계 온난화 방지를 목적으로 함

- 고속도로에서 차간 거리를 10 m로 하여 총 3대의 자율 주행 트럭이 80 km/h의 속도로 군집 주행함을 보임
- 횡 이동 제어는 컴퓨터 비전 기법인 lane marker detection에 기반을 두었고 종 이동 제어는 76 GHz의 레이더와 라이다 그리고 Dedicated Short Range Communications (DSRC) 5.8 GHz를 기반으로 한 V2V 통신을 사용하였음
- 차간 거리 10 m와 80 km/h의 군집 주행은 공기 저항을 감소시켜 에너지를 15 % 절약할 수 있음을 실험을 통해 확인하였으며 고속도로에서 이산화탄소를 2.1 % 가량 줄일 수 있음을 시뮬레이션을 통해 보임
- 본 프로젝트는 군집 주행을 통한 에너지 측면의 영향에 집중하였으며 자율 주행 차량의 자율성 보장이나 V2X 통신을 통한 서비스 제공은 고려하지 않음

다. 연구개발의 중요성

(1) V2X 통신을 이용해 자율 주행 및 자율 군집 주행 기술의 현실화를 위한 필수 연구

○ 자율 군집 주행 시스템의 안정성을 위한 flocking 행동 모델 기반의 최소 제약, 최대 자율 주행 모델 연구

- 영국의 한 연구진이 자연에서 관찰되는 flocking 행동 모델을 군집 주행에 적용함으로써 군집 주행 시의 대열 형성 및 이동에 대한 이론적인 토대를 마련하고자 하였음
- 그러나 flocking 행동 모델은 무리의 움직임을 모델링하기 위해 많은 제약조건을 가지고 있으며 자연을 자유롭게 움직이는 새, 물고기 등의 무리에 반해 차량은 제한된 도로를 주행하는 등 주변 환경 요인도 다르기 때문에 현실에 적용하는데 무리가 있음
- 따라서 훌륭히 자율 주행 하고 있는 차량 성능을 최대한 활용하면서도 flocking 모델과 유사하게 도로 환경에서 군집을 형성해 주행하는 최소한의 제약을 가지는 행동 모델을 개발함으로써 군집 대형의 안정성을 높이고 유연하면서도 질서

있는 주행을 가능하게 하는 연구가 필수적임

- 제안하는 최소한의 제약과 최대한의 자율성을 보장하는 행동 모델을 기반으로 군집 주행에 필요한 군집 생성, 합류, 유지, 이탈과 같은 기능을 정의함으로써 표준화를 위한 기반을 마련할 필요가 있음

○ V2X 통신상에서 WAVE 표준 기반의 자율 군집 주행 응용 프로토콜 표준화 및 서비스 연구

- 완성차 회사들은 V2X 통신을 포함한 정교한 자율 군집 주행 시스템을 개발 중이며 수 m의 차량 간격을 유지하면서도 고속 군집 주행 하는 것을 시연하는 등 연구를 진행 중이지만 회사마다 다른 센서와 기능을 사용하기 때문에 상호운용성이 떨어지는 단점이 있으며 현실화를 어렵게 하는 또 다른 장애물임
- 또한 현재 표준화된 WAVE나 ITS-G5와 같은 V2X 통신을 이용해 자율 군집 주행을 지원하는 프로토콜 스택이 완전하게 정의되지 않았기 때문에 자율 군집 주행 차량 간에 군집 주행을 위한 정보 공유가 어려움
- 본 연구에서는 이것을 가능하게 하는 V2X 통신을 이용한 WAVE 표준 기반 자율 군집 주행 응용프로토콜 및 서비스를 개발하고, 완성차 업체들이 타사의 차량과 자율 군집 주행을 위해 본 연구의 응용 프로토콜을 활용하게 함으로써 자율 군집 주행 기술의 현실화를 꾀함

라. 연구개발의 목표 및 범위

(1) 최종 목표

- 자율 군집 주행을 위한 군집 행동 모델 및 WAVE 표준 기반 응용 프로토콜 원천 기술 개발

(2) 세부 목표 및 범위

- 1차 연도: 최소한의 제약과 최대한의 자율을 보장하는 bio-inspired 행동 모델 기반의 자율 군집 주행 연구
 - 자율 군집 주행에 적합하게 요구 사항이 최소화된 flocking 행동 모델 연구
 - ☞ Flocking 행동 모델의 적용 방법 연구
 - ☞ 자율 군집 주행에 적합한 요구 사항 선정 방법 연구
 - ☞ 자율 주행 차량의 자율성 보장 및 복잡도 감소를 위한 제약의 최소화 연구
 - 최소화된 flocking 행동 모델 기반의 자율 군집 주행 알고리즘 개발 및 타당성 검증 연구
 - ☞ Flocking 행동 모델의 자율 군집 주행 적용을 위한 알고리즘 개발
 - ☞ 시뮬레이터를 이용한 검증 및 성능 측정 연구
 - ☞ 다른 군집 형태와의 비교를 통한 개선점 파악 연구
- 2차 연도: 자율 군집 주행을 위한 V2X 통신상의 WAVE 표준 기반 응용 프로토콜 및 서비스 연구
 - V2X 통신상에서 자율 군집 주행을 지원하기 위한 WAVE 표준 기반 응용 프로토콜 설계 및 개발
 - ☞ 자율 군집 주행을 위한 SAE J2735 기반의 응용 메시지 형식 연구
 - ☞ 군집과 군집 간의 통신, 멀티 홉 통신을 가능하게 하는 응용 프로토콜 연구
 - ☞ 군집 내 효율적인 차량 간 정보 전달 방법 연구
 - ☞ 자율 군집 주행 응용 서비스의 세부 기능 설계 및 개발
 - 자율 군집 주행의 안정적인 지원을 위한 V2X 통신의 신뢰성 및 보안성 문제 탐색 및 해결 방안 연구
 - ☞ 자율 군집 주행의 안정성 향상을 위한 V2X 통신 신뢰성 보장 연구
 - ☞ 자율 군집 주행 차량과 운전자를 공격하거나 개인 정보를 침해하는 시도를 방어하는 연구
 - ☞ 시뮬레이션을 이용한 연구 결과 검증

2. 연구수행내용 및 성과

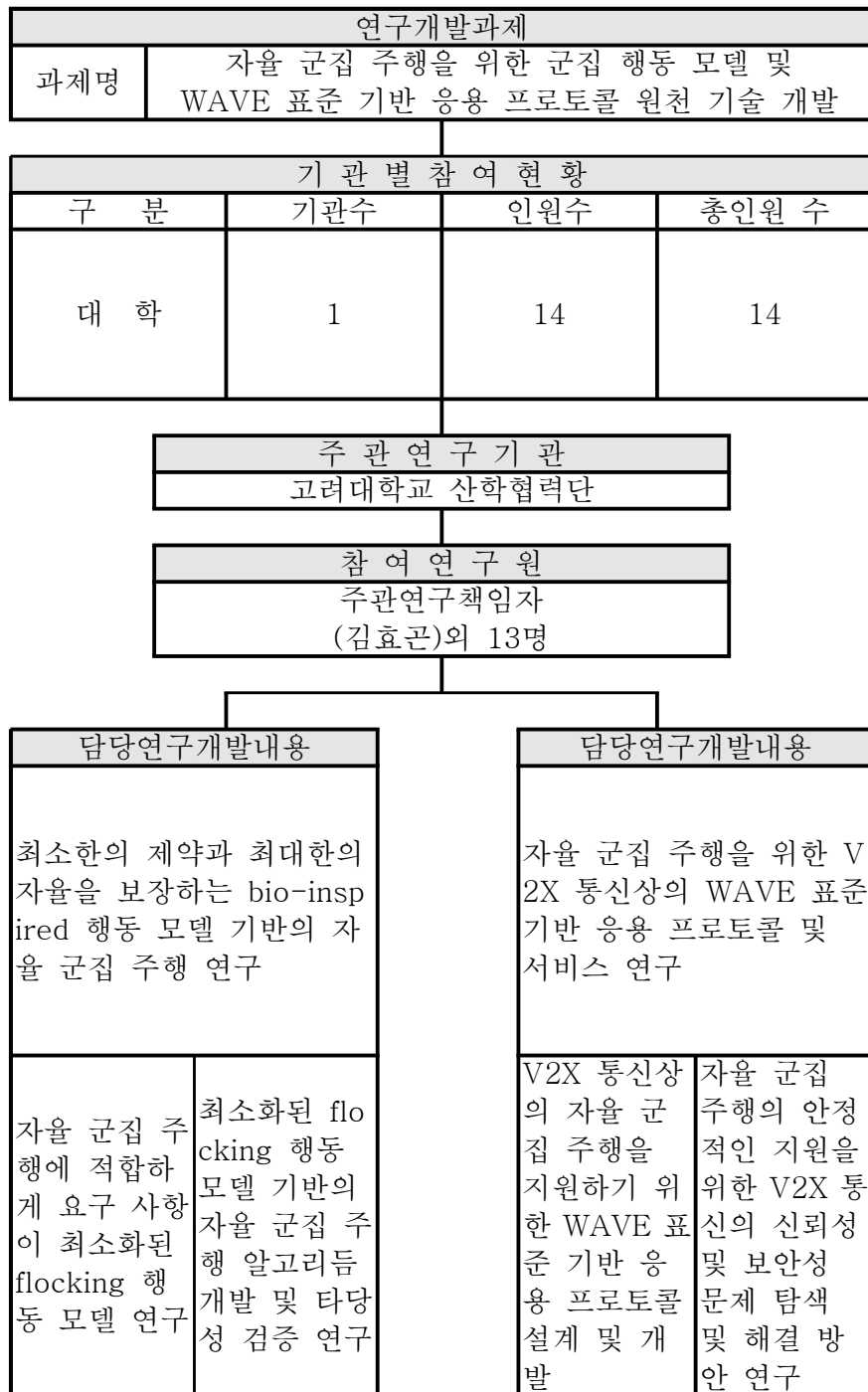
가. 접근 방법

(1) 이론 및 실험적 접근 방법

구 분	내 용 및 예시	비 고
○ 이론 및 표준 분석	- 우리 연구의 수행에 앞서, 관련된 기존 연구, 이론 및 표준에 대한 조사함 ☞ Flocking 기반 행동 모델을 개발하기 위해 기존 분산 행동 모델의 3요소 (cohesion, separation, 및 alignment)에 대해 조사함 ☞ 자율 군집 주행의 안정적인 지원을 위한 V2X 통신의 신뢰성 향상의 일환인 혼잡 제어 알고리즘 개선을 위해 최근 표준화된 SAE J2945 표준에 대해 조사함	이론
○ 이론 및 표준 구현	- 앞서 조사한 기존 연구 및 표준을 실험에 활용하기 위해 이를 simulator에 구현함 ☞ 기존 분산 모델의 3요소 (cohesion, separation, 및 alignment)를 Matlab 시뮬레이터에 구현함 ☞ SAE J945 표준의 혼잡 제어 알고리즘을 Qualnet 5.1에 구현함	실험
○ 문제점 도출	- 기존 연구 및 표준을 구현함에 있어 생길 수 있는 새로운 문제점이나 구현 후에 발생하는 새로운 문제점을 발견함 ☞ 기존 분산 모델의 환경과 자율 군집 주행 환경은 동일하지 않아, 기존 모델을 그대로 적용할 수 없음 ☞ SAE J2945 혼잡 제어 알고리즘에 따라 실험한 결과 전송 세기는 조절되지 않고 전송 빈도만 조절되는 결과가 나타남	이론 및 실험
○ 문제점 원인 분석	- 앞서 도출한 문제점의 원인을 정확하게 분석하여 이를 해결하기 위한 해결책 제시에 발판을 마련함 ☞ 자율 군집 주행 환경은 같은 차선별로 최소 안전거리를 유지하는 것이 중요하고, 차량의 좌우 움직임은 차선을 변경하는 정도의 움직임을 뜻함 ☞ 전송 세기를 결정하는 CBP가 전송 빈도의 감소로 인해 일정 수준을 유지함으로써 전송 세기가 줄어들지 않음	이론 및 실험

○ 해결책 제시	- 앞서 발견한 문제점을 해결하기 위한 해결책을 제시함 ☞ 기존 분산 모델의 3요소를 군집 주행 환경에 적용하기 위해 차선 및 속도 제어에 있어서의 구체적인 기준을 정립함 ☞ 전송 세기를 먼저 결정한 후 전송 세기가 최소에 도달한 이후에만 전송 빈도를 낮추도록 함	이론
○ 구현 및 결과 산출	- 앞서 정립한 해결책을 실험하기 위하여 실제 시뮬레이터에 이를 구현하고 실험함 ☞ 자율 군집 주행 환경에서 기존 분산 모델의 3요소를 적용하기 위한 구체적인 기준을 Matlab을 통해 시뮬레이션 할 수 있도록 구현함 ☞ SAE J2945 표준의 혼잡 제어의 성능을 향상 시키기 위한 해결책을 Qualnet 5.1에 구현함	실험
○ 성능 비교	- 앞서 제시한 해결책으로 인해 문제점을 해결하는 효과가 있는지 또는 성능이 얼마나 향상되었는지를 비교함 ☞ Matlab 시뮬레이션에서 얻은 차선 변화 및 가속 변화 등과 같은 차량 움직임 데이터를 통해 차선 및 속도 제어의 구체적인 기준이 자율 군집 주행 차량에의 기존 분산 모델 적용이 효과적이었음을 보여줌 ☞ Qualnet 5.1 시뮬레이션을 통해 전송 세기를 먼저 조절하는 기법 (Power Control First, PCF)가 기존 SAE J2945 표준의 혼잡 제어에 비해 더 짧은 Inter Packet Gap (IPG)를 나타나는 것을 보여줌	이론 및 실험

(2) 추진 체계



나. 연구 내용

(1) 1차 연도 연구 목표 - 최소한의 제약과 최대한의 자율을 보장하는 bio-inspired 행동 모델 기반의 자율 군집 주행 연구

(가) V2X 통신을 이용한 Flocking 기반의 자율 협력 주행 연구

○ 요약

- 현재 자율주행 기술은 가시거리 (line-of-sight, LOS)만 관찰할 수 있는 센서로부터 얻는 정보를 기반으로 주행 결정(driving decision)을 내리게 됨
- 이러한 경우 센서의 한계로 인해 불완전한 정보를 통해 주행 상황을 오인하여 잘못된 주행 결정을 내릴 수 있고, 이로 인해 안전에 영향을 미치고 치명적인 사고까지도 유발할 수 있음
- Vehicle-to-everything (V2X) 통신을 보완하여 이러한 문제를 완화하고, 좀 더 상황과 의도를 인식할 수 있는 방법을 군집 주행 상황에 확장·적용하고자 하였음
- 현재의 자율주행 기술은 가시거리만 관찰할 수 있는 센서에 의존하며, 가까운 곳에서 눈에 보이는 차량의 물리적 움직임에 따라 주행 결정을 내림
- 이는 센서의 한계로 인해 불완전한 정보만을 가지고 주행 상황을 오인할 수 있을 뿐만 아니라, 주변 차량의 의도를 인식하지 못하여 잘못된 주행 결정을 내리게 할 수 있음
- 그러나 가시거리 밖에 있는 (non-LOS) 차량과 주변 차량의 구체적인 의도를 파악하여 주행 결정을 내리는 것은 어려운 일임
- 우리 연구는 자동차 통신 (V2X)이 자율주행, 특히 군집주행에 어떻게 적용될 수 있는지, 그 중에서도 flocking behavior를 모방한 컨트롤러에 어떻게 도움을 줄 수 있는 지에 대한 것임

○ 서론

- 자율주행은 고정밀지도와 카메라, 레이더 (radar) 및 라이다 (lidar)와 같은 다양한 센서를 사용하여 주변 환경을 인식함. 그러나 최근의 테슬라 자율주행 차 사고에 의해 입증된 것처럼^[1], 현재의 다양한 센서도 충분하지 않을 수 있다는 우려가 여전히 계속됨
- 자율주행을 V2X 통신을 통해 보완하면 센서의 한계 또는 주행 상황의 오인으로 인해 발생하는 문제를 완화하는 데 도움이 될 것이고, 나아가 더욱 다양한 목표를 달성할 수 있을 것임
- 우리 연구는 이미 local 상황에 대한 인식을 다루는 센서를 이용하여 더 넓은

범위에 대한 자율협력주행을 지원하는 데에 V2X가 어떻게 활용될 수 있는 지를 고려하여, 이를 flocking 기반의 군집 자율주행 모델에 적용함

- 이 모델은 Reynolds의 flocking 법칙을 기반으로 하는데, 이는 자연의 새, 물고기 떼 등의 움직임을 규정한 것으로, 우리 연구는 이에 영감을 얻어 차량이 주변 정보를 바탕으로 스스로 대형을 유지하면서 주행하는 것을 목표로 함
- 이를 토대로 한 flocking 기반의 군집 자율주행 모델은 Cohesion(응집), Separation(분리), Alignment(정렬)라는 3가지 움직임 협력 주행 이동 모드[2]를 갖게 됨
- V2X를 암묵적으로 가정하고 flocking 개념을 자율주행에 도입하려는 몇몇 연구가 기존에 있었음
- 우리 연구에서는 V2X를 암묵적으로 가정하는 것이 아니라, flocking 알고리즘을 non-local 상황에 맞게 조절하고, 주변 차량과 자신의 의도를 주고받는 데에 어떻게 V2X를 구체적으로 활용할 수 있을 것인지를 연구함

○ V2X 통신을 적용한 flocking

- 일반적인 자연의 flocking 현상이 2차원이나 3차원 환경에서 일어나는데, 자율협력주행 상황은 이와 달리 대부분 도로라는 1차원 환경에서 일어남
- 따라서 우리 연구에서는 Reynolds의 법칙을 자율협력주행 환경에 맞춰 다음과 같이 적용함
 - ☞ Cohesion: 장거리 인력. 동일한 차선에서 인접한 차량 간의 거리를 최소화하여 연비와 도로 처리량을 향상시킴
 - ☞ Separation: 단거리 반발력. 동일한 차선에서 인접한 차량 간의 안전한 거리를 유지하는 힘. 옮겨가고자 하는 차선이 현재 차선보다 더 큰 separation 거리를 확보할 수 있으면, 그 의도를 주변 차량에 알리고 차선 변경을 실행할 수 있게 됨
 - ☞ Alignment: 차선 유지의 경우 고급 운전자 지원 시스템(the advanced driver assistance system, ADAS)에 의해 엄격한 안내 지침을 제공받아 시행되므로, 우리 연구의 환경에서 별도의 컨트롤은 필요 없을 것으로 가정함. 따라서 우리 연구에서는 Alignment를 도로 속도 제한이나 최고 연비를 위한 속도 등 바람직한 목표 속도를 추구하는 속도 정렬(velocity alignment)로 대신하여 연구를 진행함
- 알고리즘은 본질적으로 두 가지를 제어함. 하나는 차선 변경이고 또 하나는 속도임.
- 그리고 주행 결정을 위한 정보에 non-LOS 상황에 대한 정보와 주행 의도를 포함시키기 위해 표준 Cooperative Awareness Message (CAM)[3] 혹은 Basic Safety Message (BSM)[4]를 사용함

○ 차선 변경 제어

- 차선 변경 결정의 경우, 제한 없는 환경에서 군집(flock)의 구조적 안전성에 대한 Saber의 정의를 적용함[5]
- 군집의 구조적 에너지 H_s 는 위치에너지 (potential energy)와 운동에너지 (kinetic energy)의 합으로 나타낼 수 있음
- q_v 와 p_v 는 각각 차량 v 의 위치와 속도를 나타낼 때, 크기 N 인 군집의 구조적 에너지는 다음과 같이 나타낼 수 있음

$$H_s(q, \bar{p}) = V(q) + K_r(\tilde{p})$$

- 안전거리를 d_α 라 할 때, 위치에너지는 다음과 같음

$$V(q) = \frac{1}{2} \sum_i^N \sum_{j \in N_i} \psi(\|q_j - q_i\| - d_\alpha)$$

- 평균 속도 $\bar{p}$ 에 대하여 호스트 차량을 포함, 같은 차선 내에서 3개의 주변 차량의 상대 속도를 통해 위치에너지를 다음과 같이 정의함

$$K_r(\tilde{p}) = \frac{1}{2} \sum (p - \bar{p})^2$$

- 브로드캐스트 된 CAM 또는 BSM 메시지 내의 q 와 p 를 이용하여 각 차량은 적어도 매 초마다 H_s 를 계산할 수 있음
- 왼쪽 차선(l_L)과 오른쪽 차선(l_R) 그리고 해당 차선(l) 세 레인에 대한 H_s 를 계산한 후, H_s 가 가장 작은 차선을 이동할 차선으로 선택하게 됨
- 실제 이동을 하기 전에, 호스트 차량은 목표 위치에 투영된(projected) 차량을 통신 범위 내의 차량들에게 알림. 그림 5와 같이, V_2 는 의도하고 있는 목표 지점에 V_2' 의 존재를 알림
- 차량은 이러한 의도된 움직임과 목표 위치를 주변 차량에 알리기 위해 BSM의 Part II 내에 있는 *path projection* 정보를 활용할 수 있는데, 이는 yaw rate와 차량 속도로 설명되는 미래 경로를 나타내며 이 두 요소는 Part I (mandatory)에 표시되게 됨
- 경로 예상은 차량이 향후 주행 경로를 추정하여 예상 경로 궤도를 공유할 수 있게 하며, 이 예상 경로 추정은 차량의 미래 위치를 알려주고 차선 안의 위협과 차선 밖의 위협에 대한 classification 성능을 크게 향상시킬 수 있음

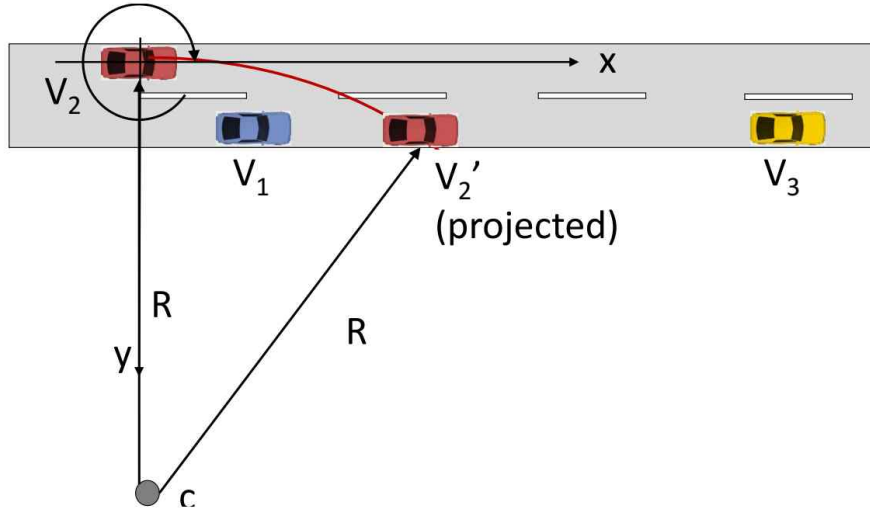


그림 5. V_2 가 오른쪽 차선으로 이동하려고 할 때 path projection을 사용하여 목표 지점을 주변에 알리는 상황

- 목표 차선에 있는 차량들은 들어오는 차량을 위한 공간을 확보해야 함. 그림 5에서 V_1 과 V_3 는 다음에서 설명할 속도 제어 알고리즘과 같이 속도를 제어함
- 또한 들어오는 차량은 영향을 받는 차량의 H_s 를 스스로 차선 변경을 시작할 정도로 바꿀 수 있음.

○ 속도 제어

- 가정: 차량은 점 질량을 갖고, 차량 상태는 $S_v = q_v, p_v, u_v$ 로 나타냄. 이 때 u_v 는 가속도를 나타내며 가속도는 곧 control을 나타냄
- 같은 차선에서 인접한 차량 j 에 대한 속도를 조절하기 위해 차량 i 에서의 control은 앞에서 언급된 위치에너지 $\psi(z)$ 의 미분인 $\phi(z)$ 로 얻을 수 있는데, 이 때 z 는 $z = \|q_j - q_i\| - d_\alpha$ 를 나타냄
- 우리 연구의 경우 한 가지 차이점은 목표 간격보다 큰 차간 거리, 즉 $\|q_j - q_i\| > d_\alpha$ 에 대해 Cohesion 규칙이 아니라 Alignment 규칙을 적용한다는 것임. 그 후 control은 다음과 같이 계산됨

$$u_i = \sum_{j \in i-1, i+1} \phi(\min(|q_j - q_i| - d_\alpha, 0)) * n + c_1(p_T - p_i)$$

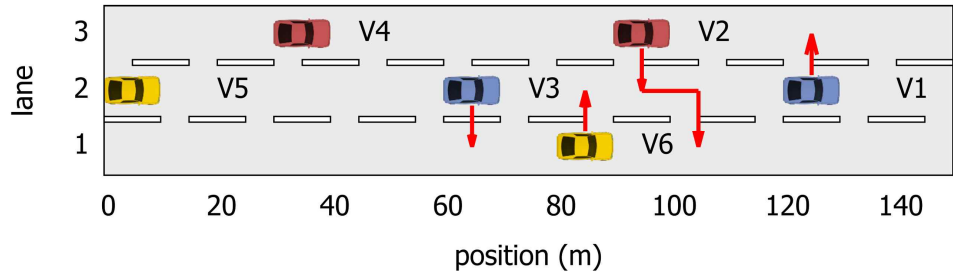
- 이 때 p_T 는 목표 속도를 나타내고, c_1 은 속도 matching을 위한 계수임. 이 논문에서는 경험적으로 c_1 을 0.2로 설정하였음
- $n = (q_j - q_i)/|q_j - q_i|$ 은 control 방향으로의 단위 벡터이고, 모든 차량은 다음 업데이트까지는 u_i 를 적용함

○ 시뮬레이션 실험

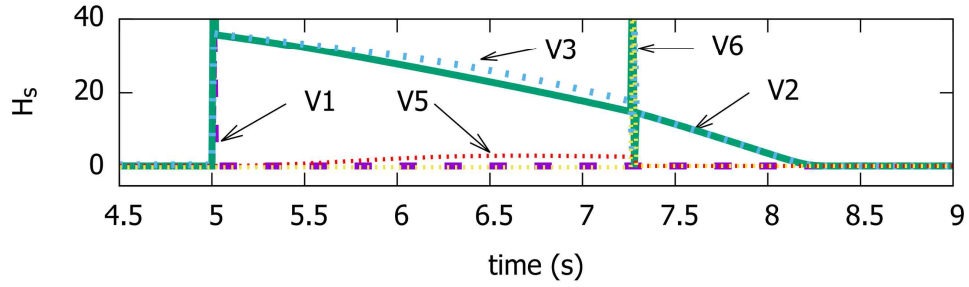
- 두개의 control 들이 센서 기반 관찰을 넘어서 제대로 작동하는지 확인하기 위해 그림 6과 그림 7의 두 가지 상황을 시뮬레이션 함
- 각 차량은 V2V 통신을 사용하여 전방 및 후방의 차량을 식별함. 주행 차선과 속도는 각각 H_s , u_i 를 사용하여 계산됨. d_a 의 경우, 정상 주행의 경우 2초, 차선 변경을 결정해야 하는 경우에는 1.5초로 설정함[6]. 그리고 차선 변경 상황을 만들기 위해 더 작은 차로 (headway)를 설정함

○ (시나리오 1) 의도 전달 (communicating intention)

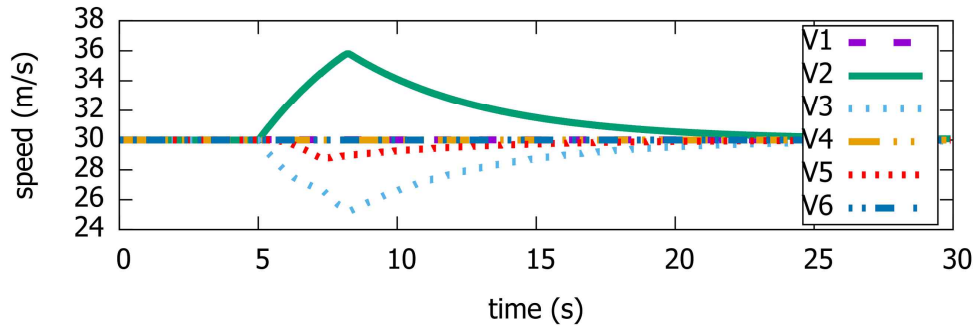
- 그림 6 (a)는 고속도로를 빠져나오기 위해 V_2 가 레인 1로 차선을 바꿔야 하는 시나리오를 나타냄
- $t = 5$ 초에서 V_2 는 차선 변경 결정을 내리고 레인 3의 첫 번째 투영 위치를 알림. 알림 (announcement)이 이루어짐에 따라 V_1 과 V_3 가 영향을 받게 됨. 특히 V_1 의 H_s 는 투영된 V_2 (그림 6 (b)) 와의 거리가 좁아짐에 따라 순간적으로 증가하지만 곧 V_1 은 레인이 레인 3으로 차선을 바꾸고 가속도가 0으로 돌아가게 됨(그림 6 (c))
- 반면 V_3 는 먼저 감속하나 레인 1로 변경됨. 레인이 비워지면 V_2 는 레인 2로 차선을 바꿈.
- V_2 가 레인 1로 다시 이동하려고 하면 V_6 는 레인 1에 투영된 V_2 의 영향을 받게 되어 레인 2로 차선을 바꿈
- 마지막으로 V_2 가 레인 3으로 이동하여 고속도로에서 나갈 준비가 완성됨
- 이러한 모든 결정은 각 차량에서 H_s 에 의해 완전히 좌우됨 (그림 6 (b)). 속도 그래프 (그림 6 (c)) 에서는 속도를 유지하면서 V_1 이 차선을 변경하는 반면 V_2 는 가속하고 V_3 는 감속하여 첫 번째 차선 변경을 안전하게 수행함
- V_3 의 감속 효과로 V_5 가 약간 느려지고, $t = 7.2$ 초에 V_2 의 두 번째 차선 변경이 이루어지면, V_6 는 차선을 즉시 변경하여 속도를 유지할 수 있으며, V_2 와 V_3 는 여전히 안전거리보다 작은 간격을 가지고 있으므로 속도를 조절하여 안전거리를 확보하게 됨



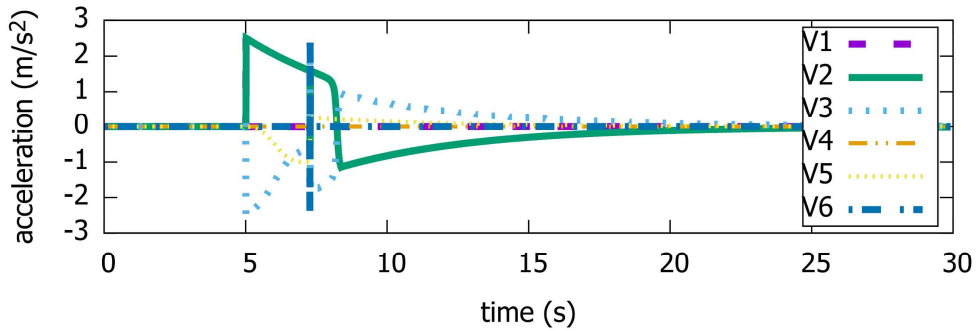
(a) Initial configuration and movements to be forced by H_s



(b) Structural energy



(c) Speed change

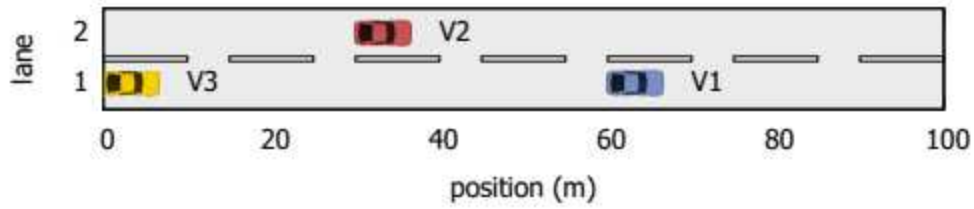


(d) Acceleration change

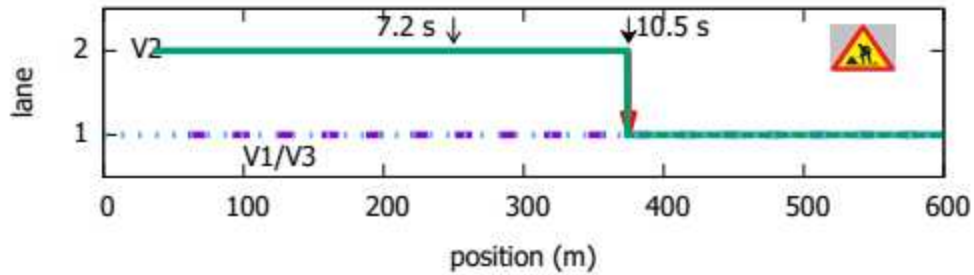
그림 6. V_2 가 고속도로를 빠져나가기 위해 투영된 움직임을 전달하고 움직이는 모습

○ (시나리오 2) non-local 상황에서의 조정 (adjusting to non-local event)

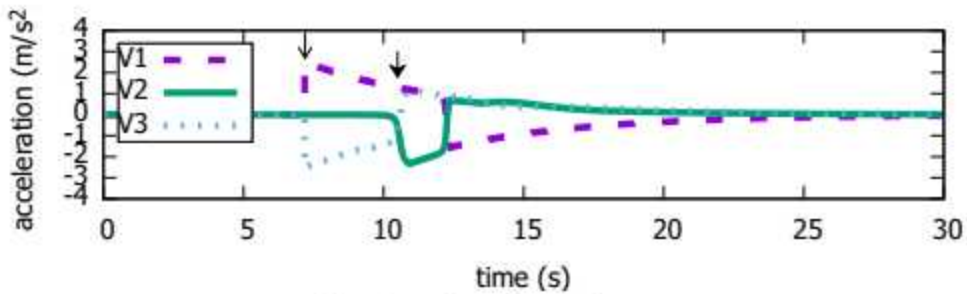
- 그림 7은 두 차선에서 30 m/s로 주행하는 3대의 차량 시나리오를 보여주고 있음. 왼쪽 차선은 V_2 보다 550 m 앞의 장애물에 의해 차단됨. V2X 통신 범위에서 300 m라고 가정하면 V_2 는 $t = 7.2$ 초에서 이 정보를 수신함



(a) Initial configuration



(b) Lane change maneuver by V2



(c) Acceleration change

그림 7. V_2 changing lanes due to roadwork

- 이 시점에서, 차선 변경의 구조적 에너지는 현재 차선에 머무르는 것보다 작음. 도로 작업 (장애물)의 상대 속도가 30 m/s에서 매우 높기 때문에 운동 에너지 $K_r(\tilde{p})$ 가 증가함. 따라서 V_2 는 경로 투영을 사용하여 CAM/BSM을 전송하여 레인 1에 들어가게 됨
- 따라서 차량은 속도를 조정하기 시작함. 구체적으로, 레인 1의 V_1 및 V_3 는 q_j 를 투영된 차량의 위치로 설정하여 앞에 식에 의해 조정함
- V_2 는 레인 1에서 안전한 공간 (즉, 1.5 초보다 긴 차선 시간)을 만들 때 차선을 변경하게 됨. 차선 변경이 완료된 후 차량은 안전거리를 확보하기 위해 앞의 식에 따라 속도를 조정하게 됨
- 이러한 시나리오는 V2X 통신이 자율주행을 지원하여 동적 주행 상황에서보다 원활하게 대처할 수 있음을 보여줌

○ 결론

- 본 연구에서는 V2X 통신이 의사소통 및 장거리 이벤트 통보를 통해 공동 자율주행의 안전성과 유연성을 높일 수 있음을 보여주었음
- V2X 향상 기능을 갖춘 적응형 모의 모형 컨트롤러는 자율주행 차량의 속도를 조정하고 안전거리를 유지하며 차량이 차선 변경을 의도 한 시점을 판단한다는 사실을 확인함
- 또한, 정상 범위의 LoS 센서 이상으로 원격 이벤트에 원활하게 반응하고 차량 무리의 토폴로지를 재배열하는 것을 시뮬레이션을 통해 확인함

(나) V2X 통신을 이용한 Flocking 기반의 자율 협력 주행 연구를 시각화 및 개선하기 위한 후속 연구

○ 요약

- V2X 통신을 이용한 Flocking 기반의 자율 협력 주행 연구 (Flocking-based cooperative autonomous driving using V2X communication)를 시각화 및 개선하기 위한 후속 연구를 진행함
- 시각화를 위한 도구로 CarSim을 선택하였고, 아래 그림 8과 같이 여러 대의 차량의 주행 모습을 시각화하고 속도, 위치, 바퀴 압력 등을 그래프로 시각화하게 됨

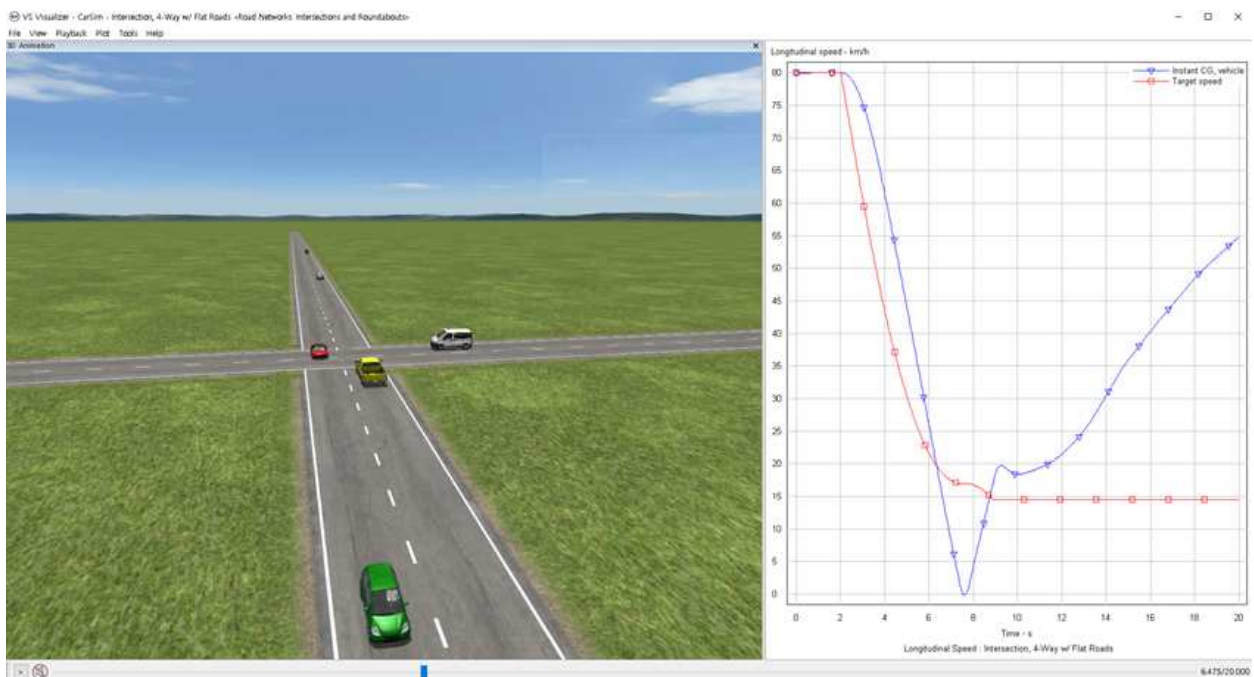


그림 8. Carsim: Visualization with Vehicle Physics Engine

○ Carsim-Simulink 를 통한 시각화

- 정해진 대로 차량들이 움직이도록 시뮬레이션을 하는 것은 Carsim만으로 가능하지만, 계산을 통해 각 상황에 맞게 차량들이 움직이도록 하는 것은 불가능함
- 단, Carsim과 Simulink (Matlab addon)을 연동하여 Simulink (Brain)이 Carsim (Environment)으로부터 각 차량들의 위치를 받아와 종합한 후, 각 차량들의 속도, 차선 (차선은 실제로 수행하지는 못함)을 결정하여 Carsim으로 전달하면 Carsim은 전달받은 정보대로 물리 엔진을 결합하여 시각화할 수 있음
- 그림 9은 Carsim의 컨트롤박스 내용을 보여주고 있음

- Simulink에서는 그림 10와 같이 블록을 배치하여 순서도 형태로 instruction 들을 진행시킴. 물론 스크립트를 하나의 블록으로 만들 수도 있음
- 예를 들어, V2X 통신을 이용한 Flocking 기반의 자율 협력 주행 연구 (Flocking-based cooperative autonomous driving using V2X communication) 에서 언급된 차량 속도, 차선 제어는 하나의 블록으로 동작함. 이 블록은 여러 대의 차량의 속도, 위치 array를 input으로 받아서 각 차량의 목표 속도 array를 output으로 반환함

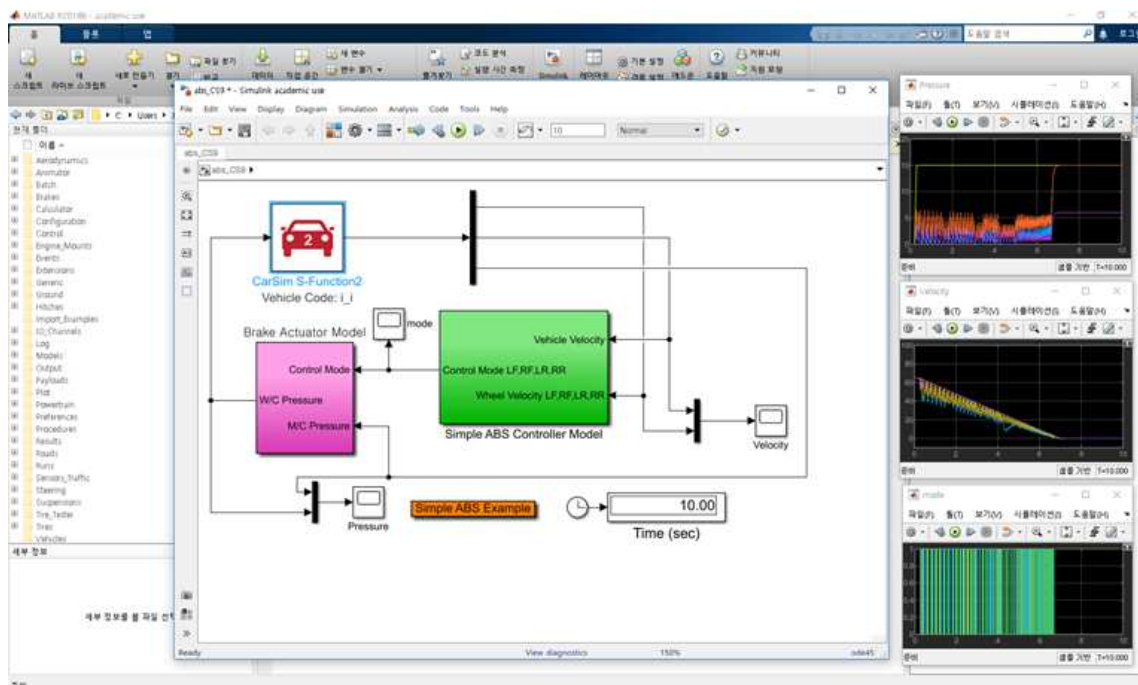


그림 9. Block을 이용한 제어 논리 구현

- 이전에는 Throttle과 Break를 Carsim으로 보내주어야 Carsim에서 차량들의 위치, 속도 등을 정해서 시각화할 수 있다고 판단했으나, V2X 통신을 이용한 Flocking 기반의 자율 협력 주행 연구 (Flocking-based cooperative autonomous driving using V2X communication)의 경우, 차량들의 목표 속도를 반환하기 때문에 Carsim에서 차량들의 목표 속도를 input으로 받아 차량들을 시각화하는 것이 가능해야 함
- 이를 위해서 고정된 목표 속도로 차량을 주행시키는 환경을 구성하고 실험을 진행함

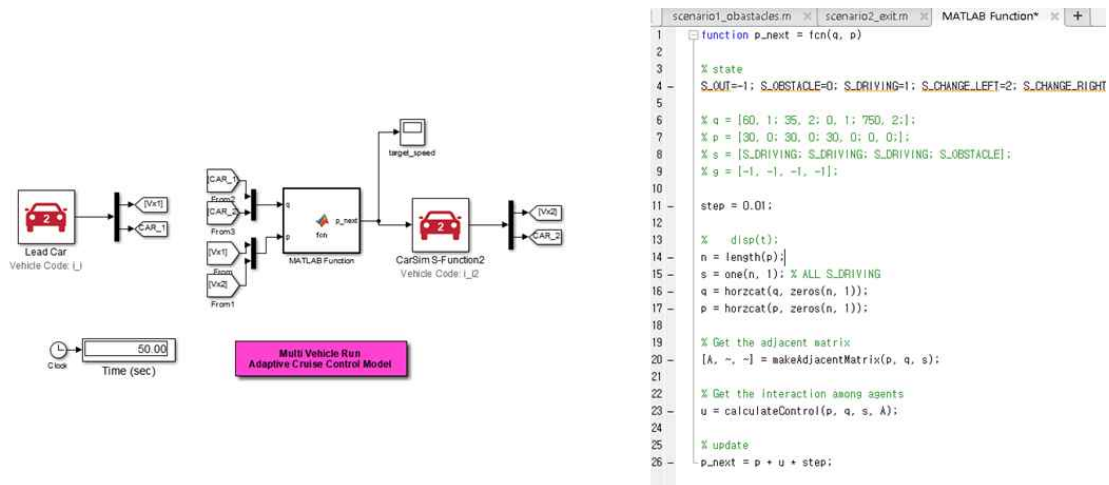


그림 10. 2대의 차량을 Simulink-Carsim 연동 제어하기 위해서 구성한 Simulink 회로의 모습.

- 그림 11은 2대의 차량을 Simulink-Carsim 연동 제어하기 위해서 구성한 Simulink 회로의 모습을 나타내고, 각각의 parameter setting은 아래 그림 12과 같음

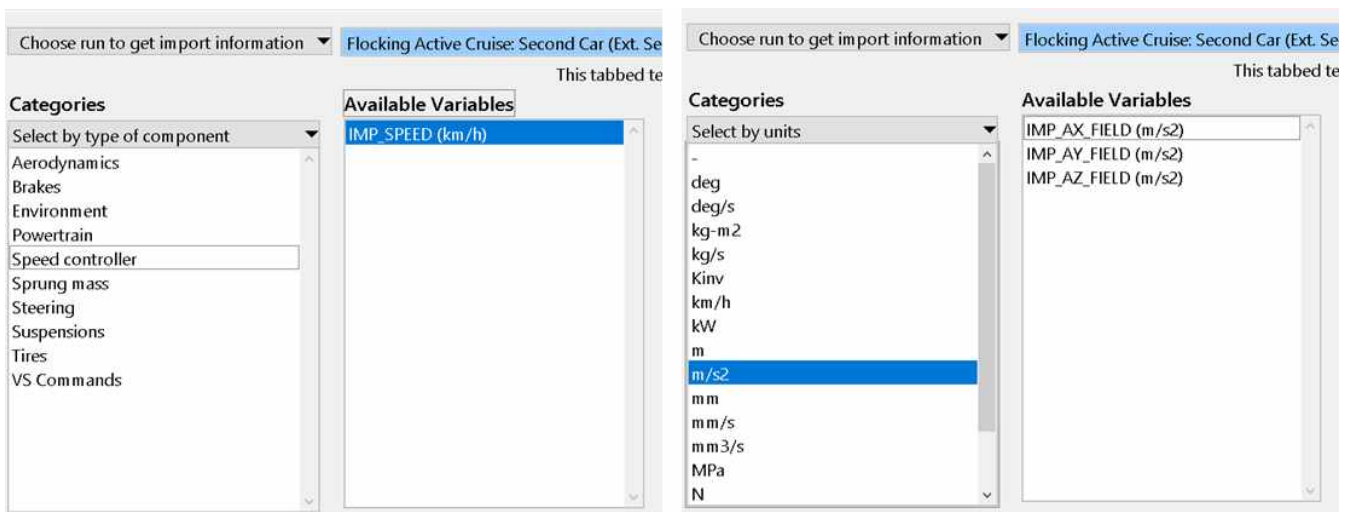


그림 11 Carsim 상의 차량에 대한 입력 값

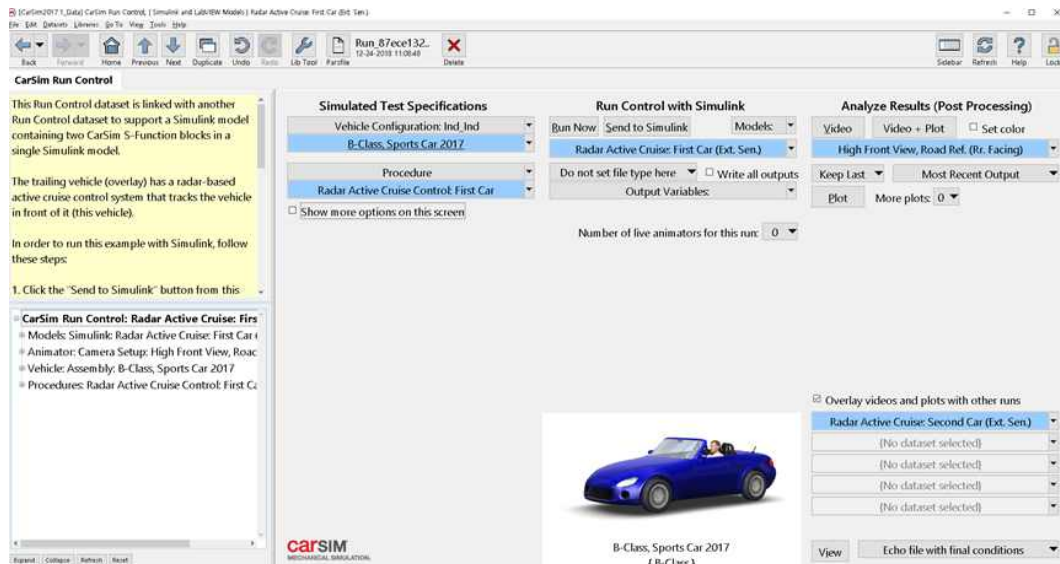


그림 12. Carsim: Customization of Experiment Environments

- 그림 13는 시뮬레이션을 통해 해당 자율주행 차량의 목표 속도 및 시간에 따른 실제 속도를 시각화한 모습을 나타냄

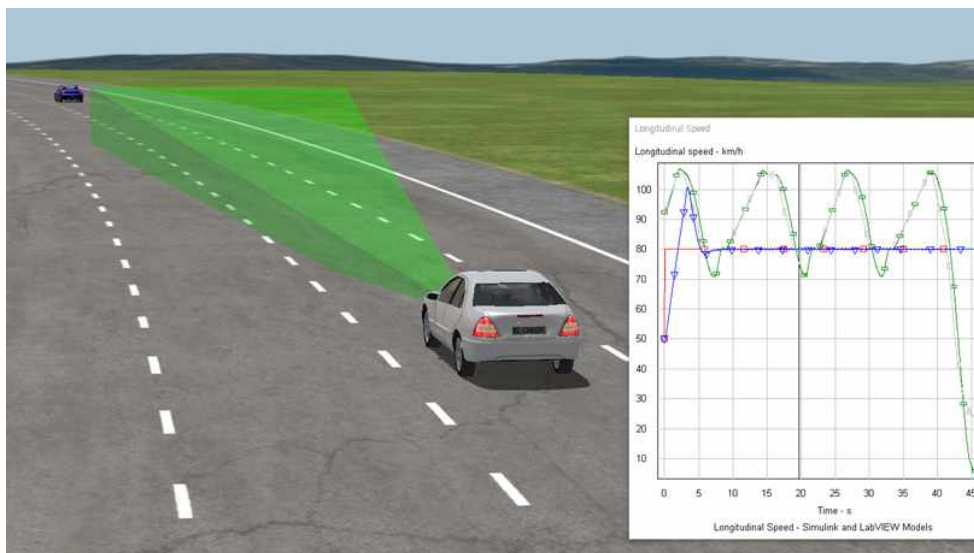


그림 13. 자율주행 차량의 목표 속도 및 시간에 따른 실제 속도를 시각화한 모습

- 그림 14은 구현한 Carsim-Simulink의 최종적인 동작 관계를 도식화한 모습임. 이를 바탕으로 V2X 통신을 이용한 Flocking 기반의 자율 협력 주행 연구 (Flocking-based cooperative autonomous driving using V2X communication)를 시각화 및 개선하기 위한 후속 연구를 진행 중임

System Topology

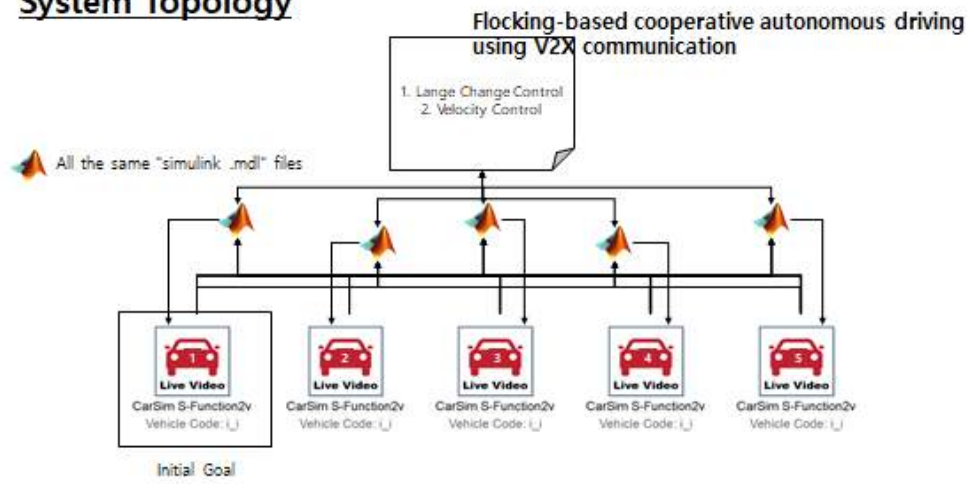


그림 14. Carsim-Simulink 의 동작 관계 도식

(다) 자율 군집 주행 차량에게 최대한의 자율을 보장하기 위한 강화학습 기반의 flocking 모델 연구

○ 요약

- 독립 자율주행 기능을 최대한 활용하는 방식의 군집 주행은 각 차량이 독립된 지능을 갖는다는 점에서 인공 지능을 활용하기 용이함
- 각 차량의 독립된 지능을 훈련시키기 위해서는 매우 많은 양의 데이터가 필요하지만 대량의 자율 군집 주행 데이터를 실제로 얻는 것은 물론이고 simulation 결과로 얻는 것도 어려움
- 반면 강화 학습은 정의한 reward를 최대화하는 방향으로 지능을 학습시키기 때문에 supervised learning이나 unsupervised learning과 같이 많은 데이터를 필요로 하지는 않음
- 자율 군집 주행 차량의 차선 변경, 군집 합류, 군집 해체 등의 상황 시 유연한 움직임을 한 경우의 reward를 높게 책정하면 사람이 직접 설계하는 알고리즘보다 성능이 좋은 지능을 손쉽게 얻을 수 있을 것임
- 익숙한 곳에서 운전하는 것이 낯선 곳에서 운전하는 것보다 수월하듯이 한 지역에 특화된 지능은 대상 지역에서의 상황에 대한 대처가 뛰어날 것이며, 이를 transfer learning을 사용하여 대상 지역에 새롭게 진입하는 차량들에게 전달할 수 있음
- 이와 같은 강화 학습 기반 flocking 모델을 만들기 위한 첫 시도로 각 차량들이 안전거리를 유지하면서 따라가도록 하는 지능을 강화 학습을 통해 학습시킴

○ 강화 학습 적용 내용

- 강화 학습의 유명한 예제인 Atari 게임을 수정하였고, 강화 학습 프레임 워크는 torch를 사용함
- 강화 학습의 3 요소 (reward, state, action) 중 action은 그림 15과 같이 총 5가지로 no action (0), 가속 (1), 감속 (2), 왼쪽 차선으로 변경 (3), 오른쪽 차선으로 변경 (2)이 있음

```

function gameEnv2:createAction()
    -- print('gameEnv2 createAction')
    --self.actions = {0, 1, 2, 3, 4}
    self.actions = {0, 1, 2}

    self._actions = self.actions
    -- action 0 -- NO OP
    -- action 1 -- accel
    -- action 2 -- decel
    -- action 3 -- left
    -- action 4 -- right
end

```

그림 15. 강화 학습에서의 5가지 action

- 보다 문제를 단순화시켜 풀기 위하여 5가지 action 중 차선을 바꾸는 action 은 제외하고 3가지만을 사용함
- 상태 (state)는 각 차량의 속도 및 위치가 포함되었고, 그림 16와 같이 초기 차량 거리와 속도를 정함 (차량 속도는 3가지의 경우로 나누었음)

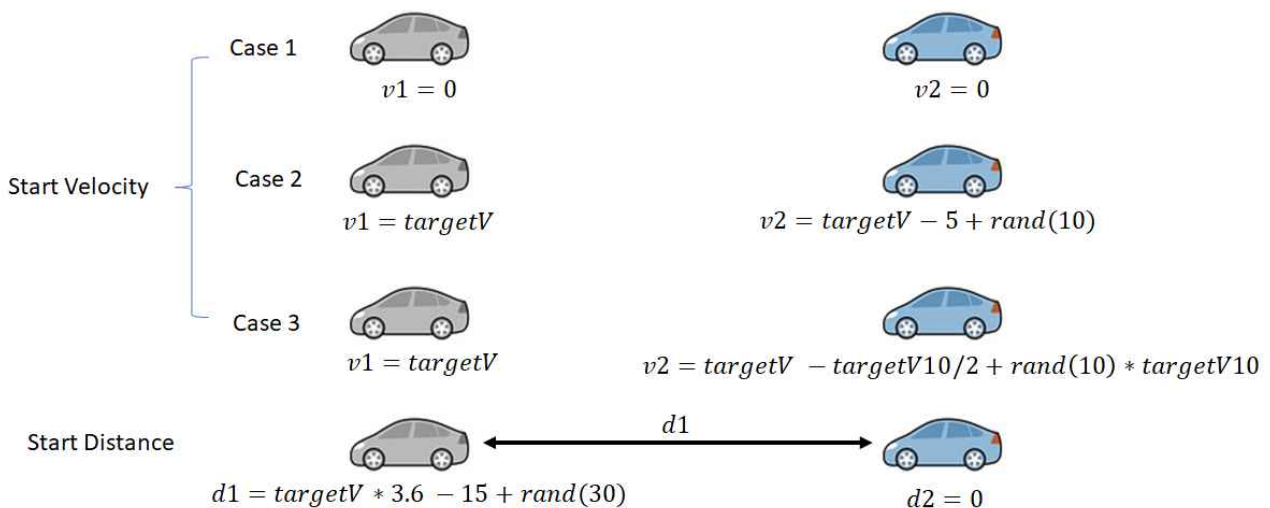


그림 16. 강화 학습에서의 초기 상태 설정

- 그림 17와 같이 안전거리를 정의하고 reward는 차량이 안전거리를 침범하지 않는 최단 거리에 있게 되는 경우 1씩 증가시킴
- 강화 학습이 진행되는 과정을 시각화하기 위하여 새로운 프레임 워크 (LÖVE) 를 적용하였으며, 이는 그림 18과 같은 2차원 게임을 만들기 위한 오픈 소스 프레임 워크로 윈도우, 맥, 리눅스에서 동작함

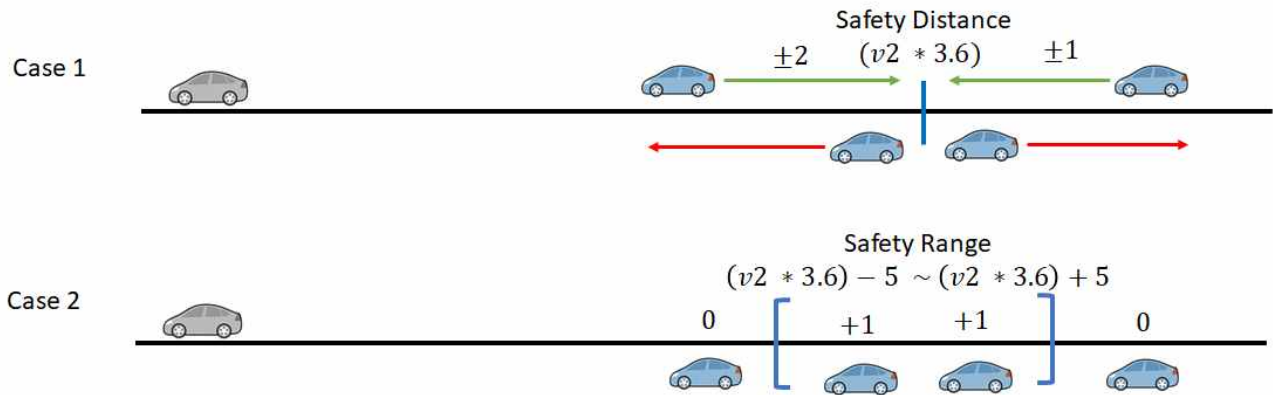


그림 17. 차량 안전 거리 및 reward 정의



그림 18. LOVE 프레임 워크에서 작동하는 게임들

- 기존의 강화 학습 구조는 그림 19와 같이 CPU 및 GPU가 학습 agent를 실행시키는 구조로 agent는 환경을 초기화 시킨 뒤, 게임과 상호 작용하며 지능을 학습시켰음

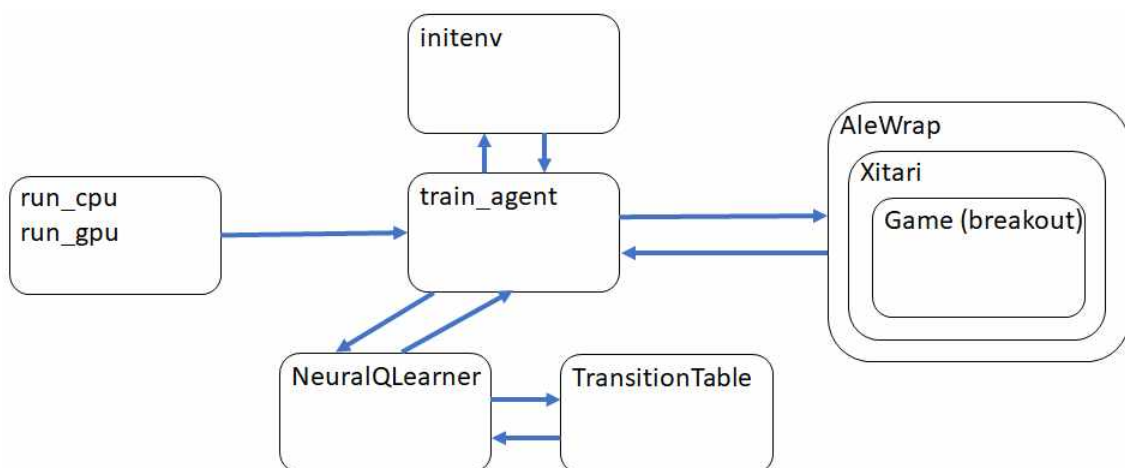


그림 19. 강화 학습을 위한 기존 구조

- 강화 학습이 진행되는 상황을 시각화하기 위하여 그림 20와 같이 LOVE를 삽입하고 loopback interface를 추가하였음

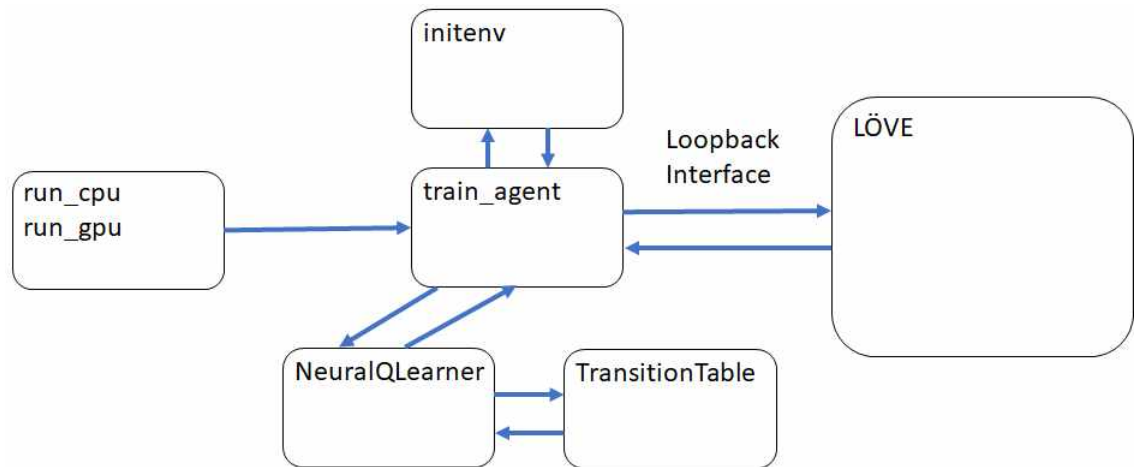


그림 20. 강화 학습 상황을 시각화 하기 위한 LOVE가 추가된 구조

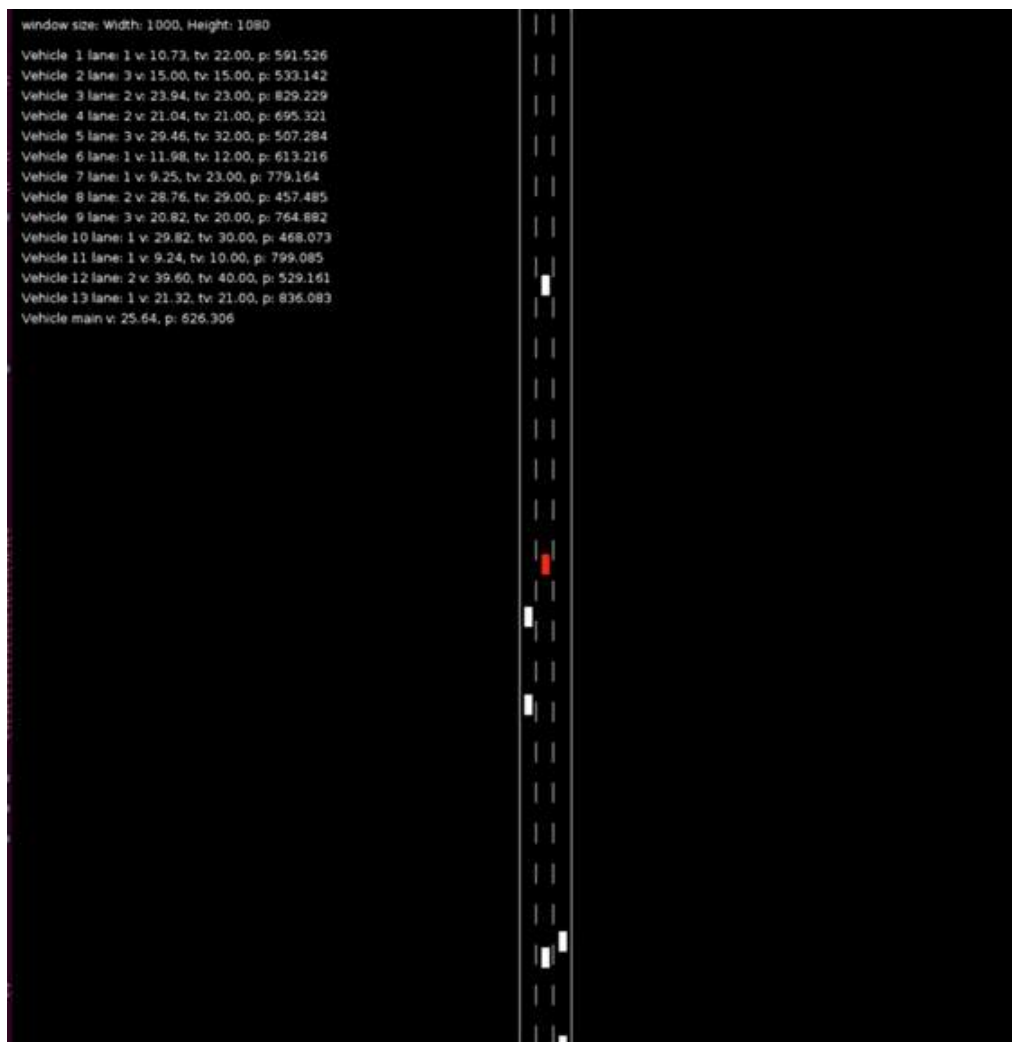


그림 21. 강화 학습 진행 상황 시각화

- 그림 21은 강화 학습이 진행되는 애니메이션 상황을 캡처한 그림으로 빨간색 차량이 가진 지능을 학습시키는 것이 목표임
- 하얀 차량은 환경에 해당하는 것으로 매 100 step마다 차량을 생성하고 300미터 거리를 이동한 뒤 없어지며 사고를 유발하지는 않음

○ 연구 결과

- 초기에 목표로 했던 각 차량의 독립된 지능을 훈련시키는 데에는 성공적이지 못하였으나, 실제 강화 학습 프레임워크를 적용한 것은 물론 이를 시각화하여 나타낼 수 있게 되는 성과가 있었음
- 선행차량을 따라가는 단순한 형태의 강화학습은 성공하였으나 flocking model과 같이 다수의 차량이 주변에서 주행하며 차선을 바꾸는 것과 같은 행위에 대한 상태를 표현하기 복잡하며 이를 reward로 제공하는 것에 대한 부분을 해결하지 못한 상태임
- 위와 같이 강화 학습을 시도 하였으나 다음과 같은 문제점들이 지속적으로 발생하였음
 - ☞ 하나의 차량에 해당하는 지능을 학습시키는데 굉장히 오랜 시간 (예. 2-3일)이 걸림
 - ☞ 강화 학습을 진행함에 있어 차량이 방문하는 상태 (state)가 매우 제한적임
 - ☞ 방문하는 상태 뿐 아니라 그 상태에 따른 action의 범위도 제한적이었음
 - ☞ 차량이 충돌을 하는 경우의 reward를 매우 크게 깎으려 하면, 차량이 충돌하지 않기 위해 전혀 움직이지 않는 action을 취함

(라) 군집 관리 프로토콜 시뮬레이션과 테스트를 위한 자료 조사

○ 요약

- VANET은 통신이 가능한 장비를 장착한 움직이는 차량들 간의 네트워크
- Intelligent Transportation Systems (ITS)에서 VANET을 위한 협력 응용을 만드는 것은 인기있음
- 이 논문에서는 Platooning Management Protocol (PMP)를 제안함
- Simulation of Urban MObility (SUMO) and Network Simulator 3 (ns-3)를 조합한 V2X Simulation Runtime Infrastructure (VSimRTI) 프레임 워크를 통해 이 프로토콜을 구현하였고 실험하였음
- 해당 프로토콜이 군집 주행을 위한 통신 요구사항을 만족시키고 안정적으로 군집 주행을 가능하게 함을 확인함

○ 자료 조사 내용

- 군집 주행은 속도 및 방향 자동화 제어 기능을 통해 차량이 서로 매우 가까이에서 주행할 수 있게 하는 응용임

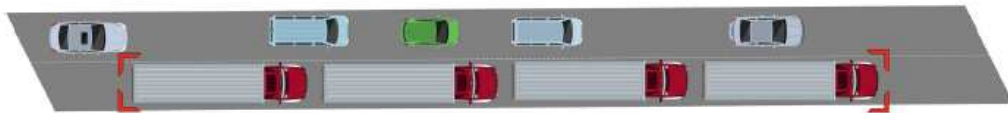


그림 22. 트럭의 군집 주행 예시

- 군집 주행을 통해 운전 안전성의 증진, 교통 흐름 개선, 고속도로의 용량 향상 등을 이룰 수 있고, 운전자에게는 편리하고 쾌적한 운전 경험을 제공할 수 있음. 또한 에너지와 연료 소비를 줄일 수 있음 (그림 22)
- 군집 주행을 구현하는 가장 간단한 방법은 차량 간 통신인 V2V를 이용하는 것임
 - ☞ 각 차량들은 자신의 상태를 전송함으로써 군집을 형성하거나 병합하는 등의 군집 주행을 위한 동작을 할 수 있음
- 군집 주행을 구현하기 위해서는 적절한 통신 행위와 요구사항을 만족하는 관리 프로토콜이 필요함
- 군집 주행에 필요한 여러 기본 동작 (operation)을 정의하고, 각 동작에 대한 메시지들을 정의함. 논문에서 정의한 동작은 아래와 같음
 - ☞ Create (군집 생성): 군집에 참여하고 싶은 차량이 주변을 확인했을 때, 참여 가능한 군집이 없다면 새로운 군집을 만들어야 함. 이때, 해당 차량은 군집의 리더 역할을 수행함

- ☞ Join (군집 참여): 군집 참여를 원하는 차량은 해당 의도를 이미 존재하는 군집에 전달해야 함. 군집 참여를 원하는 차량은 주기적으로 Join Request (군집 참여 요청) 메시지를 브로드캐스팅함. 해당 상황에 따라서 군집에 참여할 수도, 군집 참여를 거절당할 수도 있음
 - ☞ Leave (군집 이탈): 군집에서 나가고 싶은 차량은 군집 리더에게 해당사항을 알려야 함. 해당 사항을 전달받은 군집의 리더는 차량이 군집에서 나갈 수 있도록 군집을 조절하고, 군집 이탈이 완료된 차량은 리더에게 이탈이 완료되었음을 전달함
 - ☞ Merge (군집 병합): 두 군집에 속한 차량 수의 합이 한 군집이 운용 가능한 최대 차량의 수를 넘지 않는다면, 두 군집을 하나로 합칠 수 있음. 해당 동작은 뒤쪽 군집의 리더에서 시작되고 뒤쪽 군집의 리더는 합쳐진 군집에서 구성원이 됨
 - ☞ Dissolve (군집 해산): 한 군집의 리더가 해당 군집의 해산을 결정했을 때 동작함
- 논문에서는 정의한 여러 동작에 대해, ETSI TR 102 638 표준[7] 중, Co-operative vehicle-highway automation system (Platoon) 사용 예의 요구사항들을 만족시키고자 함. 각 요구사항을 정리하면 아래와 같음
- ☞ 지연 (latency)는 최대 100 ms 임
 - ☞ 상대 위치 정확성 (relative position accuracy)는 2 m 보다 뛰어나야 함
 - ☞ 군집 그룹 메시지는 최소 2 Hz의 주기를 가져야 함
 - ☞ 각 차량이 전송하는 V2V는 유니캐스트와 브로드캐스트 모드로 동작할 수 있도록 준비해야 함
- Simulation of Urban MObility (SUMO) and Network Simulator 3 (ns-3)를 조합한 V2X Simulation Runtime Infrastructure (VSimRTI) 프레임 워크를 통해 이 프로토콜을 구현하였고 실험하였음



(a) Simulation Map



(b) Real Map

그림 23. 시뮬레이션 시나리오에 사용된 브라가-포르투 고속도로

- 시뮬레이션 시나리오는 포르투갈의 도시인 브라가 (Braga)와 포르투 (Porto)를 연결하는 고속도로로 구성하였고, 해당 데이터는 Open Street Map (OSM)을 통하여 얻음 (그림 23)
- 시뮬레이션에서 PMP를 통해 군집 주행을 하는 차량은 트럭으로 설정하였고, 나머지 차량들은 모두 일반 차량임
- 또한 PMP를 운용하지 않는 기준 트럭을 설정하여, 군집 주행이 가능한 트럭들과의 비교를 진행하였음
- 각 차량의 통신을 위한 ns-3 시뮬레이터 설정은 상용제품인 Cohda MK5 On Board Units (OBU)의 통신 설정과 동일하게 설정하였음 (그림 24)

Wifi configuration	
Wifi Mac	ns3::OcbWifiMac
Physical mode	OfdmRate6MbpsBW10MHz
Wifi manager	ConstantRateWifiManager
Received signal energy threshold	-99 dbm
Received signal energy threshold (CCA Busy)	-85 dbm
Transmission gain	10.0 dB
Reception gain	-16.0 dB
Maximum available transmission level	23 dbm
Minimum available transmission level	-10 dbm
Transmission power levels	Step 0.5 dB
Signal-to-Noise-Ratio loss	3.2 dB

그림 24. Cohda MK5 OBU의 설정과 동일하게 설정된 ns-3 parameter

- 시뮬레이션에서는 15대와 3대로 크기가 다른 두 개의 차량 군집이 존재함
- 두 군집의 속도 역시 각각 20 m/s와 25 m/s로 다름
- PMP를 통하여 10 Hz의 주기로 전송된 메시지 대부분이 요구사항의 지연 시간을 만족하면서 전송되었음을 확인함 (그림 25)

Messages latency (ms)	
Mean	50.0
Median	49.1
Standard Deviation	28.7
Minimum	0.6
Maximum	100.9
Mean Number of Messages	
709181	

그림 25. 메시지 교환 통계

- 지연 시간이 100 ms가 넘는 메시지는 실험당 평균 1000개 정도로, 이는 전체 교환된 메시지의 0.2 % 수준임. 따라서 PMP는 지연 시간 및 주기성 요구사항을 잘 만족하는 것이라고 할 수 있음
- 군집의 속도는 군집의 안정성을 평가할 수 있는 지표임
- 만약 군집이 안정적으로 유지되지 못하면, 군집 내 차량들의 속도의 편차가 커짐

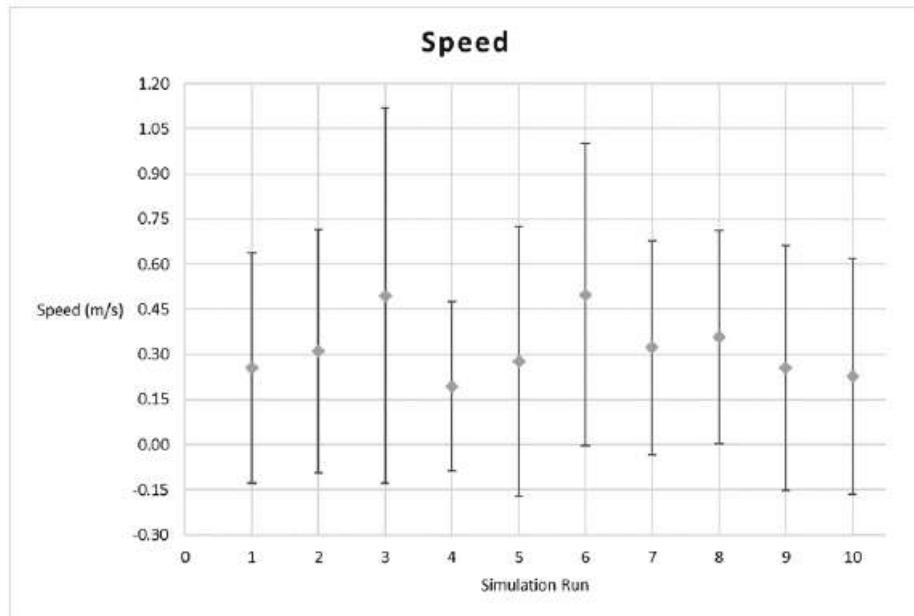


그림 26. 군집 목표 속도와 군집 내 차량의 속도 차이 평균

- 군집의 목표 속도와 군집 내 차량의 실제 주행 속도 차이를 확인하였을 때, 군집의 목표 속도인 리더의 속도를 잘 맞춰서 주행하기 때문에 편차가 크지 않은 것을 알 수 있음. 이를 통해 PMP 동작이 안정적인 군집 유지를 가능하게 함을 보일 수 있음 (그림 26)

(마) VANET을 통한 메시지 전송의 효율을 위한 연구 자료 조사

○ 요약

- 효율적인 멀티-홉 브로드캐스팅 프로토콜을 설계하는 것은 Vehicular Ad hoc Networks (VANET)에서 사용되는 충돌 방지 시스템 및 다른 응용의 실현을 위해 아주 중요함
- 현재 존재하는 프로토콜들은 특별한 시나리오에 최적화되어 있어 다양한 시나리오에 대응하지 못하는 문제점을 가지고 있음
- 네트워크 환경의 변화에 잘 대응하는 지능형 프로토콜을 설계하는 것은 중요함
- 본 논문에서는 자가 학습 (self-learning) 매커니즘을 기반으로 전송 방식을 결정하는 브로드캐스트 프로토콜을 제안함
- 프로토콜은 전송 알고리즘을 위해 여러 지표 (metric)을 고려하는 퍼지 논리 (fuzzy logic) 기반의 중계 (relay) 노드 선택 방식을 채택하였음
- 퍼지 논리에 사용되는 파라미터들은 강화 학습 방식을 사용하여 실시간으로 조정됨
- 학습이 완료되는 데까지 걸리는 시간인 수렴 시간 (convergence time)을 줄이기 위해 기존의 학습 내용을 새로운 차량에 전달하는 전이 학습 (transfer learning)을 사용함
- 강화 학습과 전이 학습, 퍼지 논리의 조합은 VANET에서 브로드캐스트 전송을 할 때, 지능형 해결책을 제공함

○ 자료 조사 내용

- VANET은 지능형 교통 체계 (ITS; Intelligent Transport System)에서 잠재적인 역할로 큰 관심을 받고 있음
- 각 차량이 이동하고 있다는 특징 때문에 VANET의 네트워크 환경은 시간과 공간에 따라 시시각각 변화하기에, 브로드캐스트 프로토콜은 네트워크 환경에 따라서 잘 조절되어야 제대로 작동할 수 있음
- 많은 브로드캐스트 프로토콜이 존재하는데, 현재의 프로토콜들은 네트워크 환경 변화에 제대로 자가 조절 (self-tunning) 하지 못함
- 따라서 논문에서는 퍼지 논리에 기반한 접근 방식을 채택하여 중계 노드를 선택하는 브로드캐스트 프로토콜을 제안함
- 퍼지 논리 기반의 접근 방식은 매우 간단한 membership 함수들과 퍼지 규칙들로 복잡한 내용을 표현할 수 있음
- 프로토콜에 사용되는 파라미터들은 Q-learning 기반의 방식을 통해 조정됨
- 또한, 전이 학습을 사용하여 학습에서 수렴 속도를 증가시키고자 하였음

- VANET에서 모든 차량은 자신의 위치와 도로 정보를 알고 있다고 가정함
- 각 차량에서 사용되는 퍼지 논리 기반의 알고리즘은 차량 간 간격, 차량의 이동성, Received Signal Strength Indicator (RSSI)을 이용해 중계 차량은 선택함
- 프로토콜에 사용되는 변수는 차량 간 간격을 의미하는 Distance Factor (DF), 차량의 이동성을 나타내는 Mobility Factor (MF), 신호의 세기에 기반한 RSSI Factor (RSSIF)로, 각 입력값은 아래의 식을 통해 계산 가능함

$$DF(X) = \begin{cases} \frac{d(X)}{R}, & d(X) \leq R \\ 1, & d(X) > R. \end{cases}$$

$$MF(X) \leftarrow (1 - \alpha) \times MF(X) + \alpha \times \left(1 - \frac{|d_i(X) - d_{i-1}(X)|}{R}\right).$$

$$RSSIF(X) \leftarrow (1 - \alpha) \times RSSIF(X) + \alpha \times \left(1 - \frac{RXThresh}{RxPr}\right).$$

- 중계 차량을 선택하는 과정은 아래와 같음
 - ☞ 퍼지화 (Fuzzification): 사전에 정의된 언어적 변수를 사용하여 파라미터들을 변환함. 각 변수의 퍼지화에 사용되는 membership 함수는 아래와 같음 (그림 27)

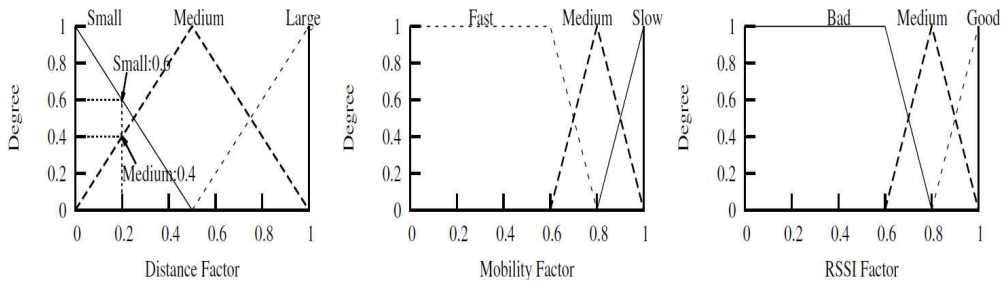


그림 27. 각 변수 별 퍼지 membership 함수

- ☞ IF/THEN 규칙의 조합과 맵핑 (mapping): 퍼지 값들을 사전에 정의된 IF/THEN 규칙들에 대응시키고, 규칙들을 조합하여 이웃 차량들의 우선 순위의 퍼지 값을 얻어냄 (그림 28)

	Distance	Mobility	RSSI	Rank
Rule1	Large	Slow	Good	Perfect
Rule2	Large	Slow	Medium	Good
Rule3	Large	Slow	Bad	Unpreferable
Rule4	Large	Medium	Good	Good
Rule5	Large	Medium	Medium	Acceptable
Rule6	Large	Medium	Bad	Bad
Rule7	Large	Fast	Good	Unpreferable
Rule8	Large	Fast	Medium	Bad
Rule9	Large	Fast	Bad	VeryBad
Rule10	Medium	Slow	Good	Good
Rule11	Medium	Slow	Medium	Acceptable
Rule12	Medium	Slow	Bad	Bad
Rule13	Medium	Medium	Good	Acceptable
Rule14	Medium	Medium	Medium	Unpreferable
Rule15	Medium	Medium	Bad	Bad
Rule16	Medium	Fast	Good	Bad
Rule17	Medium	Fast	Medium	Bad
Rule18	Medium	Fast	Bad	VeryBad
Rule19	Small	Slow	Good	Unpreferable
Rule20	Small	Slow	Medium	Bad
Rule21	Small	Slow	Bad	VeryBad
Rule22	Small	Medium	Good	Bad
Rule23	Small	Medium	Medium	Bad
Rule24	Small	Medium	Bad	VeryBad
Rule25	Small	Fast	Good	Bad
Rule26	Small	Fast	Medium	VeryBad
Rule27	Small	Fast	Bad	VeryBad

그림 28. 퍼지 논리 규칙 표

- ☞ 역퍼지화 (Defuzzification): 사전에 정의된 결과 membership 함수와 역퍼지화 방법을 이용하여 퍼지 결과를 숫자 값으로 변환함 (그림 29)

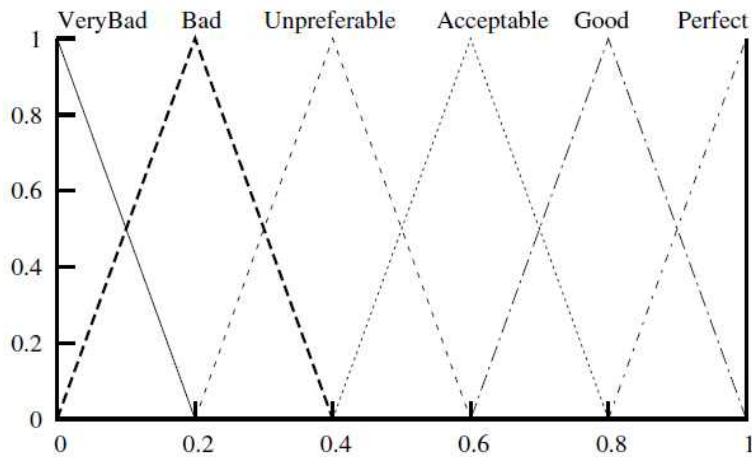


그림 29. 결과 membership 함수

- 네트워크 안의 각 차량은 강화 학습의 에이전트 (agent) 역할을 하며, 현재 네트워크 상황에 최적의 퍼지 membership 함수를 설정하도록 학습됨
- 각 차량의 퍼지 membership 함수들은 에이전트의 상태 (state)임

- 각 차량이 선택하는 행동 (action)은 7가지로, 자세한 내용은 아래와 같음
 - ☞ DF 가중치 증가/감소
 - ☞ MF 가중치 증가/감소
 - ☞ RSSIF 가중치 증가/감소
 - ☞ 현재의 설정값 유지
- 각 에이전트가 행동을 선택해 받는 보상 (reward)는 에이전트가 전송한 패킷의 수신 여부에 따라서 결정되며, 0 또는 1의 값을 가짐

$$R = \begin{cases} 1, & \text{if the packet is received} \\ 0, & \text{if the packet is lost.} \end{cases}$$

- 학습률 (learning rate) α 는 0.7로, 감가율 (discount factor) γ 은 0.9로 설정됨
- 위의 학습 조건을 가지고 테이블 기반의 Q-learning 학습 알고리즘으로 학습을 진행하였음
- 전이 학습은 네트워크에 새로운 차량 (에이전트)가 진입했을 때, 브로드캐스트 전송을 통해 Q-table이 전송되는 방식으로 적용됨
- 제안하는 프로토콜의 검증을 위해 고속도로 시나리오와 시내 시나리오에서 시뮬레이션을 진행하였음
- 시뮬레이터는 Network Simulator 2.34 (ns-2.34)를 사용하였고, 시내 시나리오 생성을 위해 Simulation of Urban MObility (SUMO)와 Traffic and Network Simulation Environment (TraNS)를 사용함
- 고속도로 시나리오에서는 각 방향으로 두 차선이 존재하고, 차선간 거리는 5 m임. 차량의 최대 속도는 40 m/s임
- 시내 시나리오에서 차량의 최대 속도는 18 m/s임. 시내에는 5개의 수평 도로와 5개의 수직 도로로 구성되어 있고, 각 도로는 각 방향으로 하나의 차선만 존재함. 이웃하는 교차로는 400 m 떨어져 존재함
- 전파 모형 (propagation model)로는 Nakagami Model을 적용하였음
- 차량 간 거리와 전송 거리에 따른 패킷의 전송 확률은 아래와 같음 (그림 30)

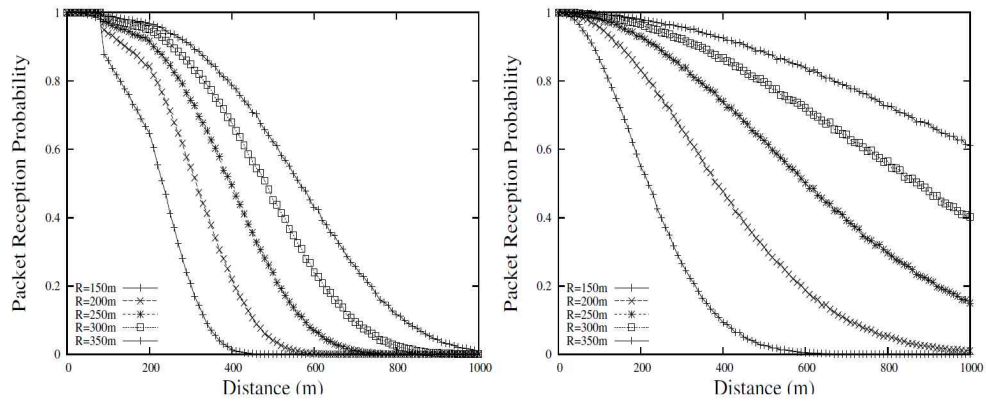


그림 30. 차량 간 거리와 전송 거리에 따른 패킷 전송 확률 (Packet Reception Ration)
(좌측: 고속도로 시나리오, 우측: 시내 시나리오)

- 제안된 프로토콜은 FUZZBR 프로토콜[8]과 비교하여 성능을 검증함

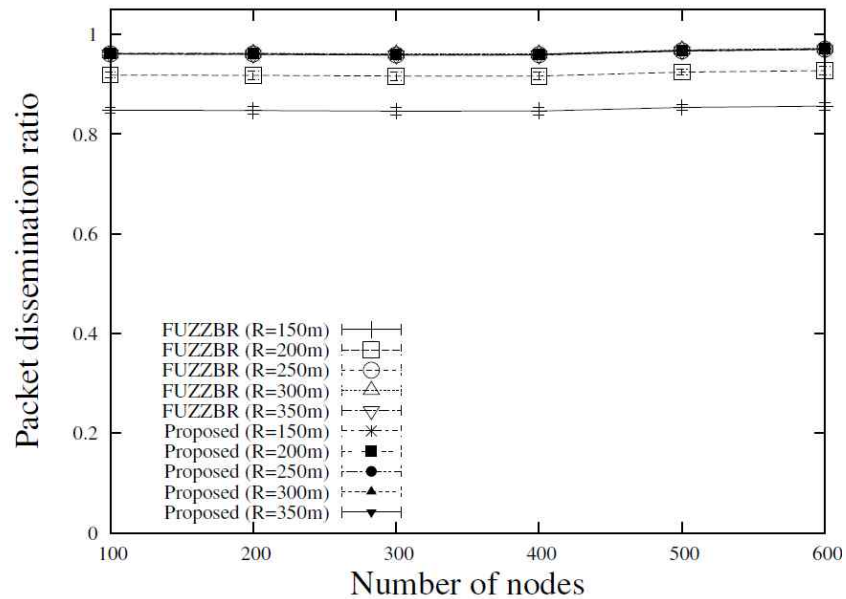


그림 31. 고속도로 시나리오에서 패킷 보급 확률 (packet dissemination ratio)

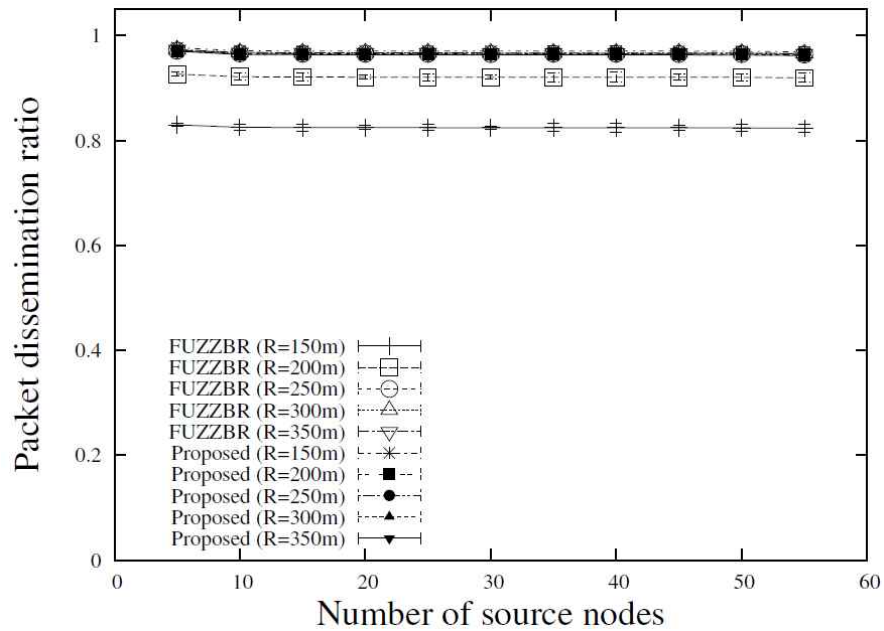


그림 32. 시내 시나리오에서 패킷 보급 확률 (packet dissemination ratio)

- 제안된 프로토콜은 FUZZBR에 비하여 다양한 전송 거리와 네트워크 밀도에서 더 나은 결과를 보임 (그림 31, 그림 32)
- FUZZBR의 퍼지 파라미터의 설정은 전송거리 250m에 대한 설정값으로, 전송 거리가 짧아짐에 따라서 성능이 급격하게 감소하는 것을 확인할 수 있음
- 제안된 프로토콜은 퍼지 membership 함수의 파라미터를 상황에 알맞게 조절 함으로써 다양한 상황에 유연하게 대처할 수 있음
- 종단 간 지연 시간 (end-to-end delay) 역시 제안된 프로토콜이 FUZZBR에 비해 더 나은 결과를 얻을 수 있었음

(바) 제한적인 CPU 성능 기반 차량 Ethernet에서 TCP 통신 문제 해결 연구

○ 요약

- TCP는 일반적인 인터넷 환경에서 최적화되어 있기 때문에 차량 Ethernet과 같은 상황에서 최대의 성능을 발현하기 어려울 수 있음. 우리는 낮은 처리 속도를 가지는 ECU와 같은 장비간의 TCP 통신에서 쓰루풋 저하 문제를 확인함
- 이는 응용 계층에서의 데이터 전송과 커널 내부에서 자원이 나누어져 사용되기 때문에 발생하는 것으로 확인하였으며, 수십 Mbps의 성능저하가 상당한 시간동안 지속됨. 이 문제를 해결하기 위해 profiling과 TCP 코드 분석을 통해서 성능 저하 현상을 해결하고, ECU 내에서 최대의 쓰루풋을 보이는 것을 확인하였음

○ 개요

- Advanced Driver Assistance System (ADAS)와 같은 복잡한 기능들이 차량에 포함됨에 따라 많은 수의 ECU가 차량에 도입되었고, 많은 ECU와 복잡한 응용들을 지원하기 위해 높은 대역폭을 가지는 통신 기술이 요구되었음. 특히 카메라 센서를 통해 입력되는 이미지를 처리하기 위한 응용이나 Infotainment와 같은 응용이 높은 대역폭을 요구함
- ECU의 응용에 대한 통합된 표준 프레임워크인 AUTOSAR에 automotive Ethernet을 표준으로 포함하게 되었으며 TCP/IP가 automotive Ethernet을 사용하는 유일한 상위 계층 프로토콜로 정의되어 있음
- 본 연구에서는 automotive Ethernet을 통한 ECU-ECU 간 TCP 통신의 잠재적 성능 문제에 대해서 연구를 수행하며, 특히 일반적인 인터넷 환경에서 최적화된 TCP 프로토콜이 높은 대역폭, 낮은 지연, 낮은 에러를 가지는 automotive Ethernet 환경에서 최대의 성능을 사용할 수 있는 지 확인함.
- 일상적으로 사용하는 컴퓨터에 비해 낮은 성능을 가지는 ECU에서 동작하는 TCP 프로토콜의 성능 저하가 발생할 수 있으며, 우리는 추가적으로 GHz 이하의 속도를 가지는 두 저속의 장치 간 TCP 통신에서 구조적으로 발생하는 문제가 있음을 확인함. 우리가 확인한 내용은 낮은 클럭으로 동작하는 ECU-ECU의 TCP 통신에 동일한 영향을 줄 것으로 예상됨
- 이 문제의 원인은 커널 영역에서 TCP가 응용으로부터 수신한 데이터를 전송하는 방법에서 발생하는 문제로, 불충분한 양의 데이터를 수신 측에 보내는 경우 수신 측에서는 불필요하게 많은 ACK 패킷을 전송하며 데이터 송신측이 불충분한 데이터 전송을 반복하는 현상을 야기함. 한 번의 불충분한 전송으로 인해 악영향의 순환 고리가 시작되고 유지되는 것임
- 우리는 데이터 전송 측의 동작을 변경하여 충분한 양의 데이터를 확보할 수

있도록 변경하고, 이 해결책이 ECU와 같이 낮은 속도로 동작하는 장치에서 Ethernet 링크를 최대한으로 활용하고 있는 것을 확인함

○ TCP 쓰루풋 성능 저하 방지 기법

- TCP는 일반적인 인터넷 환경에서 최적화 되었는데 이는 긴 지연 시간과 혼잡한 네트워크 경로의 특성을 가지고 있는 반면 차량 내 Ethernet은 같이 짧은 지연 시간과 넓은 대역을 가지는 명확한 차이가 있음. 또한 수 GHz와 여러 core를 가지고 있는 일반적인 네트워크 컴퓨터와 달리 ECU는 낮은 클럭 속도 뿐 아니라 단일 core를 가지고 있는 차이가 있음. 최근의 AUTOSAR에 대응되며 Ethernet을 지원하는 ECU의 클럭 속도는 100 MHz 이하부터 1GHz 정도의 속도를 가지며 평균적으로 500 MHz의 속도를 가지고 있으며, 대부분 ARM core를 사용하는 것을 확인하였음

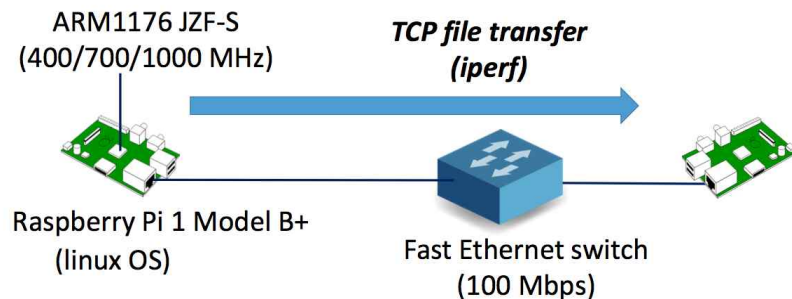


그림 33. ECUs를 대신한 RPi 기반의 실험 Testbed

- Automotive Ethernet의 환경을 설정하기 위해 100 Mbps Ethernet을 지원하며 1GHz 이하에서 클럭 속도를 조절할 수 있는 단일 ARM 코어를 가지는 Raspberry PI 1 모델을 사용함. 위 그림 33와 같이 실험에 사용되는 클럭은 400 MHz, 700 MHz, 1 GHz로 사용할 가능성이 높은 클럭에 대하여 설정함. TCP 소켓은 256 KB의 버퍼크기를 가지며, iperf 응용을 사용하여 데이터를 전송하고 응용에서 커널에 요청하는 데이터의 크기는 8 KB임. TCP 혼잡제어 알고리즘은 AUTOSAR 표준에서 정의한 것과 같은 NewReno를 사용하였음[9]

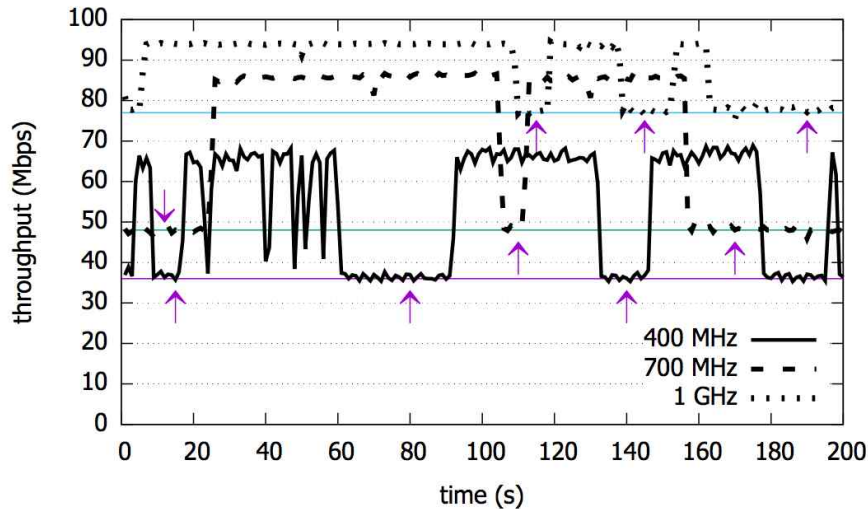


그림 34. 다른 클럭 속도에서 낮은 쓰루풋이 지속적으로 나타나는 현상

- 그림 34와 같은 클럭 속도가 상승함에 따라 성능이 향상되는 것을 확인할 수 있지만 분명한 성능 저하가 발생하고 있으며 한번 시작되고 난 이후 긴 시간 동안 유지되고 있는 것을 확인할 수 있음. 상당한 성능 저하가 발생하고 있으며, 이것이 높은 구간과 낮은 구간 두 가지 경우로 나타나고 있음을 확인시켜 주고 있음
- TCP 연결이 수립된 이후 아래 그림과 같이 동작하는데 iperf 응용이 8KB 마다 write() 함수를 통해 커널에 데이터를 공급하게 되고 커널은 이 데이터를 가지고 Maximum Segment Size (MSS) 크기의 패킷을 생성하여 전송 queue에 추가함. 패킷은 struct sk_buff (이후 skb) 자료 구조를 사용하고 있으며, tcp_sendmsg() 함수에서 데이터 전송이나 패킷화 작업이 종료된 이후 응용이 추가적인 데이터를 커널에 공급하는 형태로 동작함

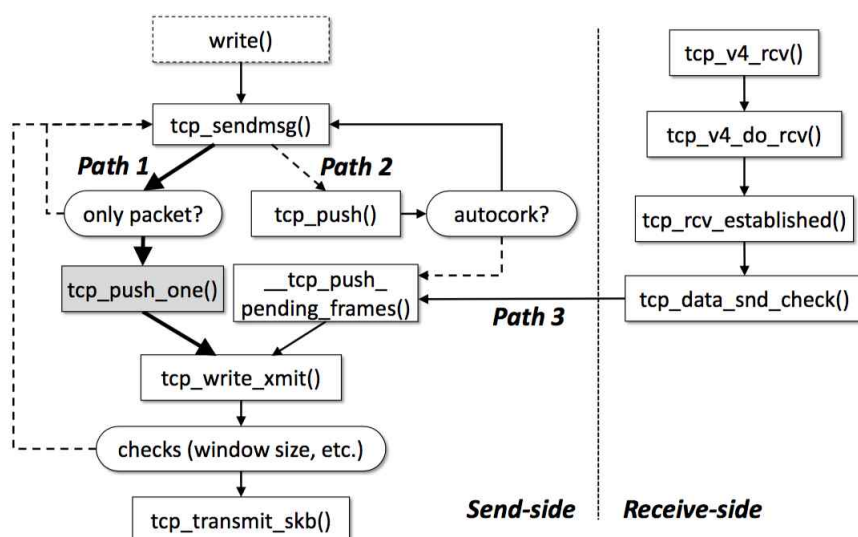


그림 35. Linux 내 커널 내 패킷 전송을 시작하는 세 경로

- tcp_sendmsg() 함수에서 TCP는 즉각적으로 생성한 skb를 전송하려고 함. 만약 새로 생긴 skb가 queue의 제일 앞에 위치하는 경우 tcp_push_one() 함수를 통해 즉각적으로 패킷을 전송하려고 함 (Path1). 이때 tcp_write_xmit() 이나 tcp_transmit_skb()에 의해 전송이 거부되지 않는 경우 패킷이 전송되게 됨.
- tcp_sendmsg()는 응용으로부터 전송된 데이터를 활용하여 더 이상 skb를 생성할 수 없을 때 까지 반복문을 수행한 이후 tcp_push_one()을 통해 전송되지 않고 queue에 남아있는 skb 들을 tcp_push() 함수를 호출하여 남아있는 패킷을 전송하게 됨 (Path 2). 마지막 경로로 ACK 패킷이 도착한 상황에서 tcp_data_snd_check() 함수가 queue에 남아있는 skb를 확인하고 남아있는 경우에 패킷을 전송하도록 함 (Path 3)

NUMBER OF INVOCATIONS PER 100 MS

	High throughput	Low throughput
tcp_push ()	132.672	68.833
tcp_push_one ()	0.024	296.098
__tcp_push_pending_frames ()	(Path 2) 7.734 (Path 3) 65.763	(Path 2) 27.770 (Path 3) 11.206

표 1. 쓰루풋 구간별 100ms 당 경로 내 함수 호출 횟수

- 앞서 언급한 세 경로에서 성능 저하를 발생시키는 경로를 확인하기 위해 각 함수들의 100ms 당 호출 횟수를 파악하기 위한 profiling을 진행하였음. 표 1에서 높은 쓰루풋 구간에서 tcp_push_one() 함수가 매우 적게 호출되고 __tcp_push_pending_frames()를 통한 데이터 전송에서 Path 2의 tcp_push() 함수 호출에 비해 매우 적게 호출되며, ACK 처리 과정에서 호출되는 Path3가 대부분을 차지하고 있음을 볼 수 있음. 이때 tcp_push() 함수에서 __tcp_push_pending_frames()를 호출하지 못한 이유는 autocorking에서 크기가 작은 skb를 전송하지 못하도록 막기 때문임.
- 낮은 쓰루풋 구간에서는 tcp_push_one() 함수가 tcp_push() 함수보다 더 많은 호출 횟수를 보이고 있으며 __tcp_push_pending_frames()의 호출 횟수 중 ACK 처리 과정 중 호출되는 횟수의 비율이 급격하게 줄어든 것을 확인할 수 있음. 이를 통해 tcp_push_one()을 통한 단일 전송으로 인해 성능 저하가 발생하며 Path 3를 통한 전송이 높은 성능을 유도함을 확인

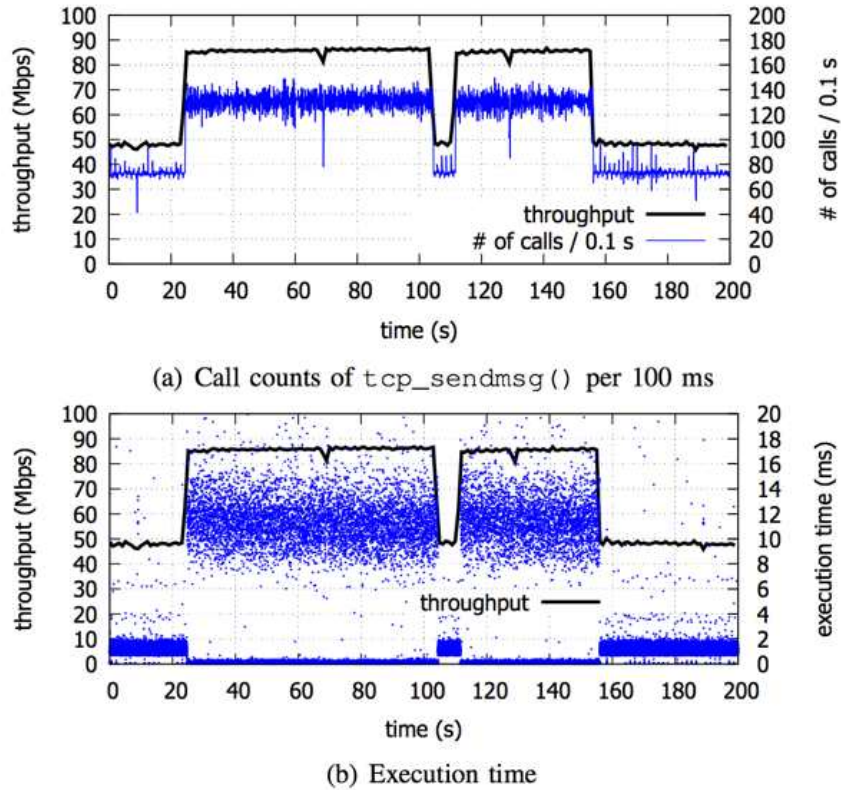


그림 36. `tcp_sendmsg()` 함수와 쓰루풋 간의 상관관계

- `tcp_sendmsg()` 함수의 호출은 응용에서 `write()` 함수를 호출한 횟수와 동일하게 판단할 수 있으며 이는 응용의 활동을 의미함. 위 그림 36 (a)는 100 ms당 `tcp_sendmsg()` 함수의 호출 횟수를 보여주고 있으며 낮은 쓰루풋을 가지는 시점에 응용은 커널에 데이터를 공급할 충분한 기회를 가지고 있지 못하는 것을 확인할 수 있음
- 그림 36 (b)는 `tcp_sendmsg()` 함수의 동작 시간들을 기록한 그래프로 쓰루풋이 낮은 시점에 2ms 에 가까운 실행 시간을 측정할 수 있으며, 이러한 이유는 그림 35의 Path 1에서 패킷을 전송하는 `tcp_transmit_skb()` 함수까지 모두 실행되는 시간으로 인해 이러한 수행 시간을 보이는 것으로 확인함.
- 쓰루풋이 높은 구간에서는 두 경우의 실행 시간을 보이며 1ms 이하의 수행 시간이 걸리는 경우는 `tcp_push()` 함수가 호출된 경우에 autocorking으로 인해 `__tcp_push_pending_frames()` 까지 호출되지 못하고 반환되는 상황이며, 이는 응용이 데이터를 커널에 공급할 추가적인 기회를 제공하게 됨. 전송 queue에 축적된 데이터 패킷은 Path 3를 통한 함수 호출로 일시적으로 전송되는 형태로 동작함. 높은 수행 시간이 걸리는 이유는 응용에서 추가 데이터가 전송된 이후 커널 영역에 남아있는 queue 공간이 없는 경우에 sleep을 수행하기 때문에 발생되며 이는 커널 내에 충분한 데이터가 공급되어 있는 상태라고 볼 수 있음

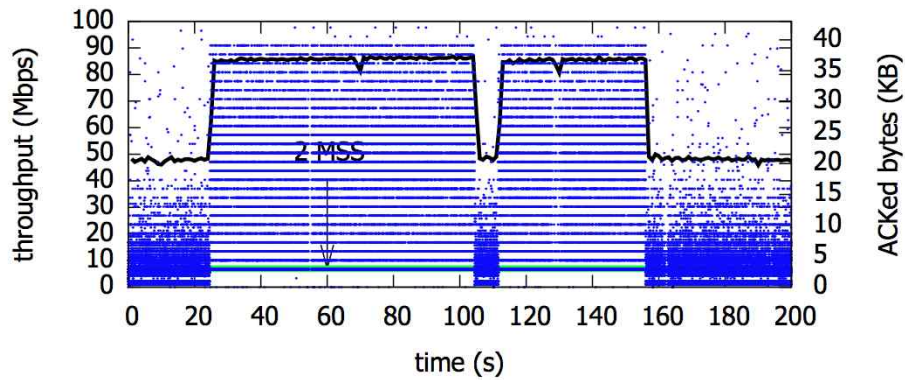


그림 37. TCP ACK에 의해 acknowledge 된 bytes

- 그림 37는 각 ACK 패킷에서 acknowledge된 바이트의 크기를 보여주고 있음. 높은 쓰루풋을 가지는 구간에서는 Delayed ACK의 기본 값인 2 MSS 보다 매우 큰 값을 보여주고 있는데, 이는 ACK로 인해 bursty한 패킷 전송이 일어나기 때문임. 이와 대조적으로 낮은 쓰루풋을 가지는 구간에서는 ACK된 바이트의 크기가 상대적으로 작으며, 심지어 1MSS 보다 작은 크기의 패킷에 대해서도 ACK를 보내고 있는 것을 확인할 수 있음. 이는 Delayed ACK를 동작시키지 못할 만큼 긴 지연시간을 송신 측에서 겪기 때문임

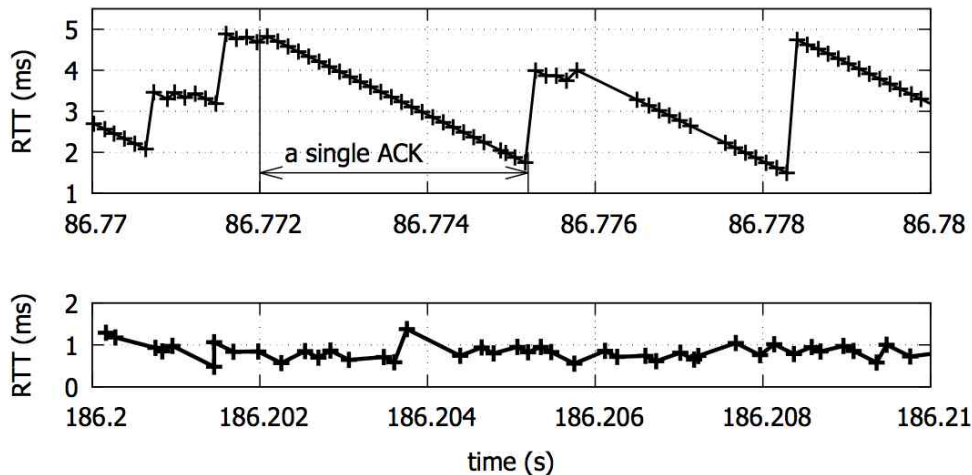


그림 38. 높은 쓰루풋과 낮은 쓰루풋 구간에서 Round Trip Time (RTT)

- 그림 38은 두 쓰루풋 상황에서 Round Trip Time (RTT)를 측정한 그래프로 아래에 있는 낮은 쓰루풋에서 측정한 값이 위의 높은 쓰루풋 상황보다 짧은 RTT를 가지고 있는 것을 확인할 수 있음. 이는 tcp_push_one() 함수를 통해 패킷을 전송하는 경우 패킷간의 시간 간격이 길어지며 데이터 수신 측에 ACK 패킷을 생성 및 전송할 수 있는 충분한 시간을 제공하게 됨. 만약 많은 데이터의 공급을 통해 수신 측에 부하를 가하는 경우 ACK를 생성할 시간이 부족하게

되고 이로 인해 RTT 값이 커지게 됨

- 앞선 조사들을 통해 더 긴 실행 경로를 가지는 tcp_push_one()을 통한 전송의 긴 시간 간격으로 인해 수신 측이 패킷을 수신한 이후 ACK 가 즉각적으로 전송되며 데이터 전송측은 이 ACK를 처리하기 위한 자원 소모가 증가되며, 이는 응용 계층이 커널로 충분한 데이터를 제공하기 더 어렵게 만들[10]. 이 현상의 구성 요소는 상호간에 영향을 주기 때문에 현상이 유지되며 시작의 원인이 전송 측에서 호출되는 tcp_push_one() 이며, 이 함수가 적게 호출되는 형태의 접근이 필요함
- 제안하는 해결 방법은 tcp_sendmsg() 함수 내에서 tcp_push_one()의 호출 조건을 변경하는 방법을 취함. tcp_push_one() 함수의 호출 조건인 새로 생성한 skb가 queue의 가장 앞에 위치하는 패킷일 경우 전송하는 조건에 추가적으로 현재 전송중인 패킷이 없는 경우에 한해 호출이 가능하도록 하는 조건을 추가하여 그림 39과 같이 수정함

```
if ((skb == tcp_send_head(sk))
    && (snd_una == snd_nxt))          /* <-- NEW */
    tcp_push_one(sk, mss_now);
```

그림 39. 추가되는 tcp_push_one() 호출 조건

- tcp_push_one()의 잦은 호출을 방지하며, 응용으로부터 전달받은 데이터가 모두 패킷화가 된 이후에 tcp_push()를 통해서 queue 내부에 위치한 패킷을 전송할 수 있으며, tcp_push()를 통해서 전송되지 않더라도 Path 3를 통해 전송될 수 있기 때문에 전송 가능한 패킷이 방해받는 경우는 없을 것으로 예상됨. 또한 Delayed ACK 알고리즘이 작동하는 시점에 많은 데이터에 대해 단일 ACK 패킷으로 처리할 수 있기 때문에 이 부분에서 효율이 증가할 것으로 보임. 이는 데이터 전송 측에 ACK로 인한 부하를 감소시키며 응용이 더 많은 데이터 패킷을 커널에 공급할 수 있도록 함

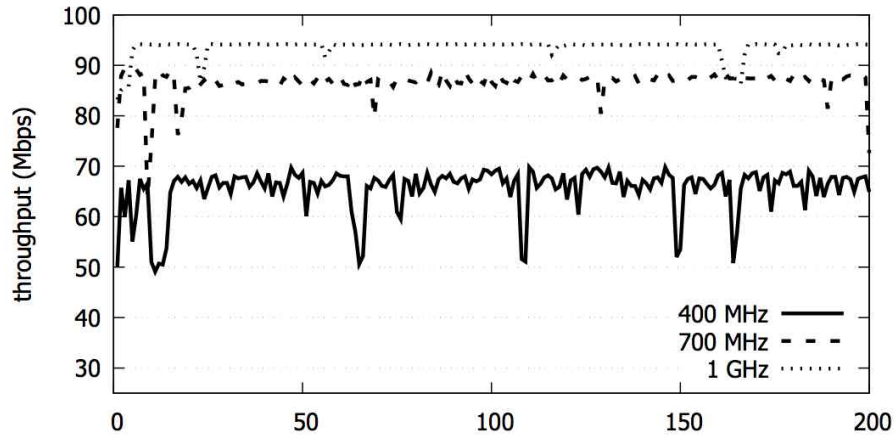


그림 40. 코드 수정 후 문제가 해결된 쓰루풋 성능

- 그림 40는 본 연구에서 제안한 방법을 사용하기 이전과 이후의 성능을 나타내는 그림으로, 커널 내부에 제안한 방식을 구현 및 테스트하여 측정한 결과임. 본 연구에서 사용하는 모든 동작 속도에서 성능 저하가 발생되더라도 즉각적으로 복구하는 형태로 안정적인 성능을 보이는 것을 확인함

○ 연구 결과

- TCP를 사용하는 ECU-ECU 간 통신에서는 제한적인 ECU의 성능으로 인해 TCP 전송 측이 통신에서 병목이 됨. TCP ACK는 전송 측의 성능 저하에 원인이 되기 때문에 가능한 한 적게 전송해야 함. 이 연구를 통해 TCP 코드 수준에서 더 많은 ACK 패킷이 생성되도록 하며 이 원인이 운영체제와 관계없이 TCP에서 패킷이 생성된 이후 즉각적으로 보내려고 하기 때문인 것을 발견함.
- 긴 시간동안 유지되는 낮은 쓰루풋 현상은 차량 내 Ethernet을 통한 ECU의 통신에서도 발생할 것으로 예상되며, 단일 패킷의 전송을 제한하는 추가적인 조건을 적용하여 의도하지 않은 악영향 없이 TCP가 최대의 쓰루풋을 내는 것을 보임. 이 연구를 통해 차량 내 Ethernet을 통한 ECU 간 통신에서 TCP 쓰루풋 저하 현상을 막기 위해 커널 수정이 필요할 것으로 예상할 수 있음

(2) 2차 연도 연구 목표 - 자율 군집 주행을 위한 V2X 통신상의 WAVE 표준 기반 응용 프로토콜 및 서비스 연구

(가) 군집 주행을 위한 대체 차량 통신 모드 연구

○ 요약

- 군집 주행 응용은 군집 주행을 하지 않는 주변의 다른 차량의 통신에 심각한 영향을 미칠 수 있을 정도의 높은 메시지 주기를 요구함. 이 문제를 해결하기 위해 다양한 전송 방법에 대해 조사한 결과 우리는 브로드캐스트(broadcast)를 모방하는 유니캐스트(unicast) 기반의 의사-브로드캐스트(pseudo-broadcast)를 제안함
- Pseudo-broadcast는 리더 차량으로부터 최악의 수신 상태를 보이는 군집의 멤버를 목적지로 설정하여 전송함. 그리고 군집의 다른 차량은 unicast 패킷을 가능한 한 수신하며, 군집의 멤버가 리더로 전송하는 경우에도 군집의 다른 멤버는 동일한 방법으로 패킷을 수신함.
- Pseudo-broadcast 내 unicast 전송은 broadcast와 달리 재전송이 가능하며, 이는 군집의 통신을 안정적이게 할 뿐 아니라 지연의 요구 조건을 만족시키기 위한 주기적인 메시지 전송을 최소화 할 수 있음
- 제안한 방법을 통해 주변의 비 군집 주행 차량에 대해 대역폭의 낭비로 인한 영향을 줄이고 조화로운 공존을 조성할 수 있음. 이 일은 군집 주행 차량과 비 군집 주행 차량이 동일한 무선자원을 공유하며 공존하는 것에 대한 첫 번째 연구이며 정량적인 분석을 제공함

○ 개요

- Light vehicle에 대해서 IEEE WAVE 기술의 탑재가 의무화 되며 가까운 시일 내에 현실화될 것으로 예상할 수 있음. WAVE 배포의 가장 선행되는 목표는 안전 운전이며, 이 목적을 위해서 각 차량은 위치, 속도, 가속도, 그리고 방향에 대한 정보를 주기적으로 전파함. 차량 간 통신(Inter Vehicle Communication, IVC)을 통해 교환된 비콘은 협력적으로 주변 상황을 인지할 수 있도록 하고 충돌로 인한 사고를 줄일 것으로 예상됨
- 차량 간 통신을 잘 활용할 것으로 예상되는 응용은 연료 효율 증가, 도로 수용량 향상, 운전자 편의를 위해 리더 차량을 가까운 거리에서 기차 형태로 따라가는 군집 주행임. 군집의 각 차량의 동적 상태와 목표 속도, 차량 간 거리, 위치, 가감속, 의도 등과 같은 리더의 결정은 BSM이나 군집 응용의 메시지 타입에 담겨 주기적으로 전파됨
- 군집 주행의 뜻에 맞게 매우 짧은 거리 간격을 두고 차량들이 주행하기 때문

에 정보의 전파에 있어 짧은 지연시간과 안정성이 군집 구성원 간의 충돌을 방지하기 위해 매우 중요함. 이 이유로 각 차량의 움직임에 대한 정보를 10 Hz 이하로 전송해야 함. 다른 이유로는 군집의 string stability가 약화되는 경우 다른 군집과의 충돌 위험이 높아지거나 군집의 효율이 낮아지기 때문임. 차량 간 간격이 줄어들수록 더 높은 주기로 메시지를 전송해야 함

- 군집 멤버들은 고정적인 비콘 메시지의 전송 간격을 유지하기 위해 혼잡 제어의 사용을 제한하고 있는데, 이는 대부분의 다른 차량 간 통신 응용에서 채널 사용에 기반한 혼잡 제어로 인해 더 낮아질 수 있는 최대 10 Hz 비콘 주기와 명백하게 다름
- 군집 멤버의 혼잡 제어를 수행하지 않는 높은 주기의 통신은 각 차량에 대해 매우 적은 통신 자원만을 남겨놓는 군집으로 인해 가까운 거리에 있는 비 군집 차량의 안전에 위협이 될 수 있음. 그러므로 군집이 비 군집 차량과 조화롭게 도로를 공유하기 위해 비 군집 차량의 무선 자원을 독점하지 않으면서 높은 주기와 통신 안정성 요구조건을 만족할 수 있는 새로운 해결 방법이 필요함. 전송 주기와 통신 안정성에 대한 부분은 Packet Delivery Ratio (PDR) 와 Information Age (IA)를 통해, 비 군집 차량에게 할당되는 무선 자원은 Channel Busy Percent (CBP)를 통해서 측정할 수 있음
- PDR은 안정적인 통신의 가장 우선적인 지표이지만 높은 PDR 만으로 응용이 성공적인 전송을 통해 이득을 보는 것으로 해석할 수 없음. 임의로 트래픽의 양을 줄이며 패킷 충돌의 양을 감소시키면 PDR 수치를 높게 만들 수 있음. 하지만 패킷간의 간격이 크다는 것은 응용이 메시지 교환을 매우 드물게 한다는 뜻으로 해석할 수 있음
- 추가적으로 두 번째 지표인 IA는 응용에 더 중요한 지표로 차량 움직임이 성공적으로 갱신된 이후 지난 시간을 의미함. 느린 차량 운동 정보의 갱신은 잠재적인 충돌 확률을 높이기 때문에 차량의 안전 응용 차량에 있어 매우 중요함. 따라서 IA가 낮을수록 군집 응용의 안전을 더 높일 수 있음
- CBP는 측정 간격동안 무선채널이 사용되는 퍼센트이며 PDR과 IA를 해치지 않는 선에서 CBP는 효율적인 채널 사용 방법에 대한 내용을 확인할 수 있는 지표임. 앞서 언급한 PDR과 IA과 충돌되는 지표이기 때문에 이 세 지표를 만족시키는 연구를 수행함
- 군집 주행의 통신에 있어서 특이한 점은 대부분의 정해지지 않은 대상으로 전송하는 차량 간 통신 안전 응용과 다르게 멤버들이 정해져 있다는 것임. 이것은 매우 중요한 특징으로 군집 멤버 간에 다른 전송 방식을 사용하여 전송할 수 있다는 점임.
- 하지만 군집 내의 각 차량 간에 unicast를 통한 전송 방식은 대역폭 요구치가 더 늘어나기 때문에 대체하는 방법이 될 수 없음. IEEE 802.11 multicast

에는 멤버십 기능이 있지만 broadcast 방식과 동일한 한계를 가지고 있는데, 수신에 대해 파악하거나 재전송을 할 수 있도록 하는 피드백 방법이 없음. 이에 따라 우리는 unicast 방식을 수정한 pseudo-broadcast 방식을 만들어 현재의 통신 모드에 있는 단점들을 극복하려고 함.

- pseudo-broadcast 방식은 unicast 전송 방식으로 unicast의 재전송하는 특성을 포함하고 있음. 재전송을 이용하기 위해서는 수신자를 지정해야 됨. 군집 주행에서 따라가는 차량은 리더에게 주기적으로 운동 상태에 대한 정보를 전송해야 하기 때문에 리더가 수신자가 되며, 리더의 경우 군집의 멤버로부터 업데이트 되는 패킷의 PDR을 기반으로 최악의 PDR을 가지는 대상을 수신자로 결정함
- SAE J2945/1 표준을 기반으로 측정되는 PDR은 다른 차량으로부터 전송되는 메시지를 기반으로 측정되기 때문에 대칭 채널 측정을 가정하면 측정된 PDR을 기반으로 측정하는 차량으로부터 다른 차량에 대한 PDR 또한 예측할 수 있음. 군집의 리더는 표준을 통해 의무적으로 측정되는 PDR을 통해 제일 나쁜 PDR을 가지는 차를 대상으로 함
- pseudo-broadcast는 MAC 계층의 기법으로 단일 hop 통신 성능을 향상시키게 되는데 만약 군집이 매우 길어지는 경우 마지막 follower까지 다중 hop 통신을 통해 메시지를 전파해야 하는 것이 필수적임. 이러한 경우에도 pseudo-broadcast는 다중 hop 상황에서 동일하게 적용되어 성능을 향상시킬 수 있기 때문에 긴 군집에도 적용이 가능함

○ 군집을 위한 의사-브로드캐스트

- 우리는 pseudo-broadcast를 활용하여 군집의 리더가 비콘과 명령을 군집의 모든 follower에 전송하며 follower는 그들의 상태와 센서 정보를 리더에게 전송하는 것으로 가정함. 군집 내에서 근거리의 멤버간의 통신에 대해서는 이 연구에서 다루지 않는데 리더에게 전송하는 메시지를 엿들을 수 있기 때문임
- pseudo-broadcast는 unicast 목적지 주소를 사용하는데 이때 새로운 IEEE 802.11 프레임 형식을 사용할 필요 없이 프레임 형식 값을 0b11로 변경하여 사용함. 또는 미래에 표준화와 충돌이 발생할 것을 고려하면 DSRC 장비가 리더의 맥 주소를 기반으로 sniff 하도록 할 수 있음
- 둘 중 어느 방법으로 전송되더라도 unicast 방식과 같이 지정된 수신자가 pseudo-broadcast 프레임을 수신한 것에 대해 MAC 계층의 acknowledgment가 전송됨. 이때 지정된 수신자가 acknowledgement를 전송하지 않는다면 IEEE 802.11 MAC은 자동적으로 재전송을 수행함. 재전송은 CWmin이 7 슬롯이며, 91 us이기 때문에 빠르게 수행됨. 만약 최대 6회인 재전송이 모두 실패하는 경우 패킷 간격과 backoff, 전송 지연 등을 모두 포함하더라도 10ms을 겨우

넘는 수준이며 이는 10Hz 로 전송하는 경우에서 패킷 간격인 100ms 보다 매우 짧은 것임

- 수신측에서는 지정되지 않은 수신자도 목적지 MAC 주소에 관계없이 pseudo-broadcast 프레임을 수신함. 이는 많은 sniffing 프로그램에서 확인할 수 있듯이 device driver를 수정하여 가능하도록 하게 할 수 있음. 이 방식은 비 군집 차량이 자신의 정보는 일반적인 broadcast를 통해 전송하더라도 군집에서 전송되는 패킷을 수신할 수 있음. 이는 군집이거나 비 군집 차량이 broadcast나 pseudo-broadcast를 사용하는 것에 관계없이 차량의 움직임에 대한 정보가 모두에게 공유된다는 것임. 만약 군집이 특정 메시지의 내용을 군집 멤버에게만 전송되기를 원하는 경우 메시지 내용을 암호화 하는 형태로 사용할 수 있음
- 가장 낮은 수신을 보이는 follower를 지정된 수신자로 한 경우에 발생하는 흥미로운 결과 군집을 대상으로 전송하는 메시지에 대해서는 MAC 계층의 재전송이 수행된 이후 패킷 손실이 줄어드는 것을 확인할 수 있음. 재전송은 엿듣는 수신자가 지정된 수신자보다 조금 높은 에러율을 가지고 있지만, 이는 단순한 broadcast로 전송하는 것 보다 더 나은 성능임. 이는 지정되는 수신자에 대해서 수신하지 못한 프레임들에 대해서 재전송이 수행되기 때문임
- 예를 들어 지정된 수신자가 {p1, p2, p5, p10} 패킷을 손실할 때. 군집의 다른 follower는 무선 채널의 통계적 특성으로 인해 {p1, p3, p10} 패킷을 잃어버릴 수 있음. 이때 리더로부터 재전송이 수행되더라도 다른 follower들은 promiscuous 수신 방법을 통해서도 p3 패킷을 복구할 수 없음
- 다른 결과는 최악 수신 follower 둘의 에러율이 변경되기 때문에 지정된 수신자가 지속적으로 변경된다는 것임. SAE J2945/1 표준에서는 매 초마다 PDR을 측정하게 되며 PDR이 낮은 두 차량 중에 지정된 수신자가 매초마다 선정되게 됨. 이 두 차량을 제외하고는 지정 수신자의 변경이 손실율에 큰 영향을 받지 않음
- 우리 해결방안에서 주의할 점 중 하나는 IEEE 1609 표준에 따른 pseudonym 변경을 위해 지정 수신자의 MAC 주소가 동기화되어 변경되는 것임. 이는 군집의 리더와 지정된 수신자간의 pseudno-broadcast 링크를 끊게되는 것임. 그러므로 MAC 주소의 변경은 상위 계층인 군집 주행 응용의 프로토콜을 통해 리더에게 전달되어야 함. pseudonym 변경은 pseudo-broadcast에 영향을 줄 뿐만 아니라 군집 멤버들간의 통신에도 영향을 줌. 우리는 상위 계층에서 pseudonym 변경과 MAC 주소 변경으로 인한 군집 멤버쉽이 관리되는 것을 가정함

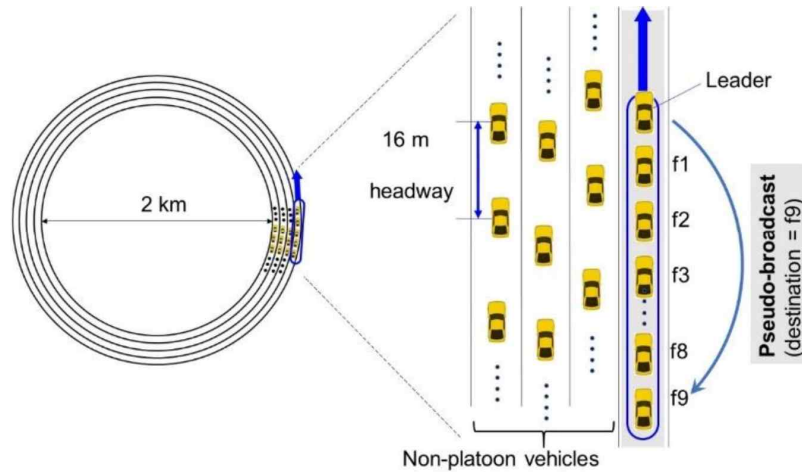


그림 41. 시뮬레이션 시나리오: 군집의 리더가 군집 follower로 pseudo-broadcasting하는 시나리오

○ 시뮬레이션 환경

- pseudo-broadcast가 군집의 메시지 전송 성능에 미치는 영향을 알아보기 위해 시뮬레이션을 수행함. Qualnet 5.1 시뮬레이터를 사용하고 그림 41과 같은 시뮬레이션 시나리오로 선정함. 4차선의 2km 지름의 원형 도로이며 각 차량의 크기는 5m 임. 비 군집 차량들은 안쪽 원형 3개 차선에 위치하며 지나가는 군집 차량들과 무선 자원 경쟁하는 역할을 수행함. 비 군집 차량들은 250 Bytes의 BSM을 SAE J2945/1 표준에서 허용하는 최 주기인 10 Hz로 전송함. 안테나와 안테나 사이의 간격은 16m 이며, pseudo-broadcast를 포함하지 않은 상태에서 약 62 %의 무선 채널 사용량을 가짐. 이 채널 사용량은 SAE J2945/1에 의해 정해진 혼잡제어의 하한선인 vMinChannel (50 %)과 상한선인 vMaxChannel(80 %) 사이에 위치함. 혼잡제어를 통해 생성될 이 정도의 CBP 값에서 군집이 비 군집을 통과할 때 군집의 통신 성능을 측정함
- 우리는 무선 채널은 two-ray ground path loss를 가지도록 하며, 최근의 연구에 따라 사이드 미러에 안테나를 부착하는 경우 Line of Sight (LoS)를 보장하게 되기 때문에, Rician Fading model 의 K 값은 3으로 설정함. 모든 패킷은 6 Mbps와 20 dBm으로 전송되며 모든 차량의 Rx sensitivity는 -85 dBm 임. 나머지 변수들은 IEEE 1609.4와 IEEE 802.11에서 정해주는 기본 변수를 사용함
- 군집은 열대의 차량으로 구성되어 있으며 가장 바깥쪽의 차선에서 90 km/h로 주행함. 더 긴 군집도 가능하지만 일반적으로 짧은 군집이 실제로 고려되고 있음. 예를 들어 5대의 트럭 군집은 European Truck Platooning Vision에서 2020년 까지를 목표로 하고 있는 3대 이상 보다 많으며 European SARTRE 프로젝트의 5대와 동일함

- 군집 차량은 범퍼간의 0.5 초 간격을 유지하며 이는 90 km/h 일 때 12.5 m 거리이며 이에 군집의 총 길이는 약 160 m가 됨. 그림 40에 표기되지 않았지만 군집의 멤버 또한 pseudo-broadcast를 통해 리더에게 비콘을 전송함. 앞서 언급한 것과 같이 최악의 수신을 보이는 두 수신자를 지정 수신자로 하는 경우에 그들의 패킷 전송 성능이 변경될 것임. 하지만 수신자를 변경하는 것의 성능이 평균화 되므로 결과부분에서는 f9이 지정 수신자로 설정된 경우에 대해서만 결과를 보임

○ 패킷 전달율

- 그림 42은 f9를 지정된 수신자로 설정한 상황에서 리더의 전송에 대한 나머지 follower들의 packet delivery ratio (PDR)를 비교하는 그림임. 여기서 패킷이 단일 전송인지 재전송으로 인한 것인지를 고려해야 함. pseudo-broadcast를 사용하는 전송은 일반적인 broadcast 전송에 비해 성능을 명확하게 향상시키는 것을 관찰할 수 있음. 일반적인 broadcast는 리더로부터 군집의 follower까지가 거리가 멀어지면서 성능이 급격히 떨어지는데 이에 반해 최악의 수신자에 대한 pseudo-broadcast는 성능 저하 속도가 느려짐

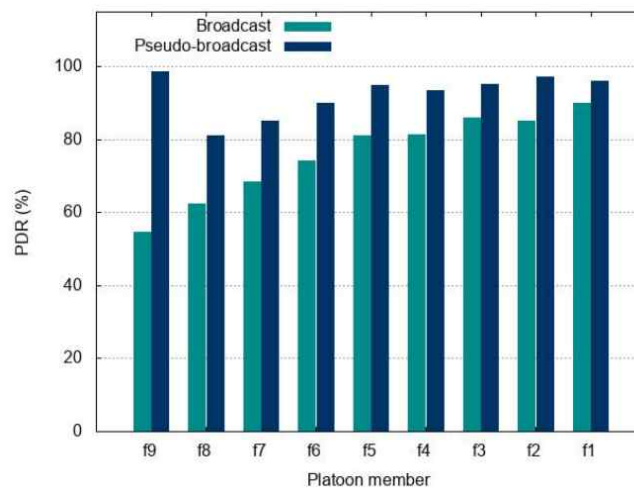


그림 42. 10대의 멤버로 구성된 군집 내 follower들의 PDR

- 손실율의 상승은 대부분 채널 상태의 악화와 hidden-terminal로 인해 충돌로 인한 결과 때문임. 하지만 pseudo-broadcast의 최악 수신 follower를 목적으로 하는 재전송으로 f9의 PDR은 100 %에 가까운 수치를 보임. 손실되는 패킷은 IEEE 802.11 MAC에 의해 최대 6회 만큼 재전송이 수행됨. 엿듣는 방식을 통해 최초 전송과 재전송을 통해 다른 follower는 일반적인 broadcast에 비해 10~20 % 정도의 성능 향상을 얻음. 160미터에 달하는 군집에서 모든 follower의 PDR은 모두 80 %를 넘음. 이에 따라 군집 행동의 안전에 중요한

안정성에 있어서 pseudo-broadcast가 broadcast에 비해 눈에 띄는 성능 향상을 보임

○ 정보 연령 (Information age)

- 군집 차량의 주변 차량에 대한 제어는 주변 차량의 예측된 움직임에 영향을 받으며, 작은 information age 값은 예측의 에러를 줄이는데 중요함. 만약 차량으로부터 주기적인 전송에서 패킷 손실이 일어난다면 재전송 지연이나 전체 메시지 주기만큼의 지연이 차량의 information age에 추가됨. 전통적인 broadcast는 메시지 주기만큼의 지연을 겪게 되고 pseudo-broadcast는 재전송이 성공하는 경우에 한해 재전송으로 인한 지연을 겪게 됨

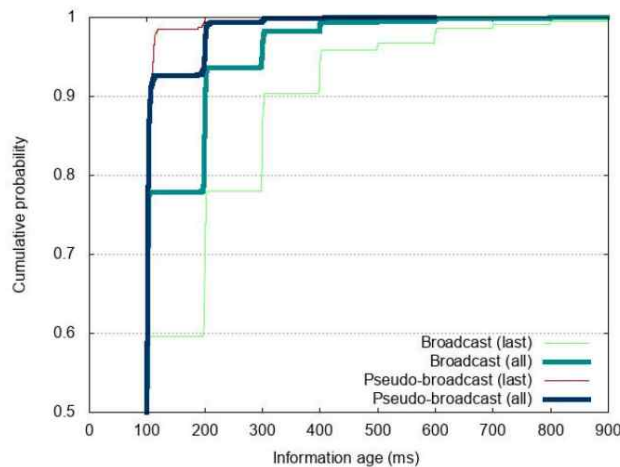


그림 43. 군집 리더가 전송한 비콘의 정보 연령

- 그림 43는 리더 차량의 비콘이 군집 내 최악의 수신자와 전체 멤버들에 대해서 broadcast와 pseudo-broadcast를 통해 전송되었을 때 information age를 나타내고 있으며 우리의 예상과 같은 결과를 보임. 그림 내에서 계단 형식의 증가는 비콘을 손실한 경우 각 비콘의 주기가 information age에 더해지는 것을 보임. 이는 기본적인 broadcast에서 더 극명하게 나타나는데 90-percentile에서 최악 수신 follower의 information age는 304 ms이며, 99-percentile에서는 700 ms에 달하는 것을 볼 수 있음. 이와 대조적으로, pseudo-broadcast의 경우에 90-percentile의 information age는 107 ms이며 99-percentile은 고작 197 ms 임
- 이는 pseudo-broadcast가 많은 경우에 다음 비콘 이전에 손실된 패킷을 복구한다는 것임. 군집 내 모든 follower들을 고려했을 때 pseudo-broadcast를 사용하면 information age가 더 나옴. 일반적인 broadcast의 90-percentile은 201 ms이며, pseudo-broadcast는 106 ms임. 또한 pseudo-broadcast는 200

ms 이내에 군집의 모든 멤버에 대해 97 % 메시지를 전달한 반면, 일반적인 broadcast는 87 %밖에 전달하지 못함. 이를 통해 pseudo-broadcast가 일반적인 broadcast에 대해서 information age부분에서 더 낫다는 결론을 내릴 수 있음

- 군집의 follower로부터 리더에 대한 패킷 전송의 PDR은 f9의 99.5 %를 제외하고 100 %를 보임. 이는 follower로부터 전송되는 움직임 정보가 안정적으로 전송된다면, 정보를 잘 가지고 있는 상태에서 결정을 내리는데 도움이 됨. follower들 간에 평균 PDR은 93.6 %을 보이며, 중간에 있는 차량으로부터 전송이 제일 높은 PDR을 기록함. 이는 그림 42에서 확인할 수 있는 일반적인 broadcast의 PDR값과 다른 결과임

○ 채널 점유율 (Channel Busy Percentage)

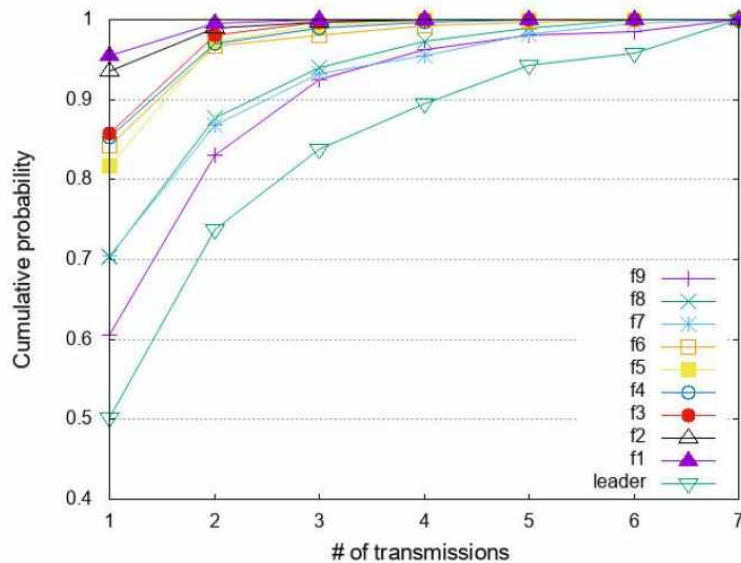


그림 44. pseudo-broadcast를 사용하는 군집 멤버의 전송 횟수

- 대역폭 사용량의 측정 관점에서 그림 44은 군집 차량들의 pseudo-broadcast 내 비콘 전송 개수를 나타내는 그림임. 이를 통해 주어진 군집 설정에서 리더로부터 최악 수신 follower에게 전송한 비콘이 최초의 전송 시도에서 절반이상 실패한 것을 확인함. IEEE 802.11 MAC 계층에서는 손실을 복구하기 위한 상황에서 최대 6번의 재전송을 수행함. 이때 재전송은 최악 수신 follower의 손실을 복구하기 위해서 뿐만 아니라 군집의 중간에 위치한 follower에서도 추가적인 재전송 비용없이 그들의 손실을 복구하는데 사용됨
- 리더에 대한 pseudo-broadcast 재전송은 리더에 가까울수록 재전송을 적게 수행하는데 첫 번째 follower인 f1은 첫 번째 시도에 95%에 가깝게 성공함. 이를 통해 가까운 follower일수록 추가적인 대역폭 사용에 적은 부분만을 차

지하는 것을 확인할 수 있음

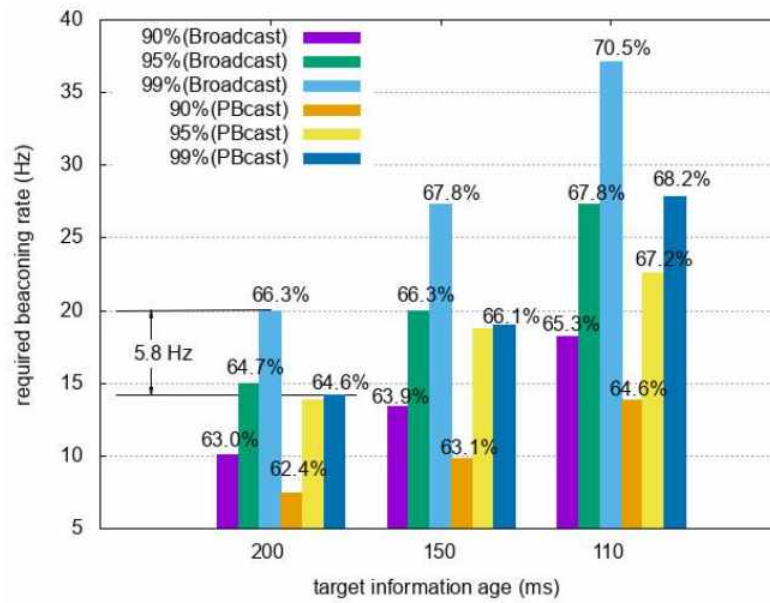


그림 45. broadcast 방식과 pseudo-broadcast 방식에서 요구되는 information age를 만족시키기 위한 비콘 주기와 관찰되는 CBP 값

- 재전송 관점에서 대역폭 사용을 확인하기 위해 information-age-equivalnet beaconing rate (IABR)을 사용함. 이는 주어진 관찰된 information age의 $\alpha\%$ 가 latency τ 를 만족하기 위한 비콘 주기로 정의되며, 이런 요구조건을 만족시키는 가장 적은 주기를 IABR이라고 명칭함. IABR은 pseudo-broadcast나 broadcast에 따라 다른데 이는 두 방식이 전송하는 방법이 다르기 때문임. 그림 45에서 α 가 90, 95, 99일 때 IABR을 보인 것임
- IABR 값을 계산하기 위해, 주어진 information age 경계에서 요구되는 percentile에 만족할 때 까지 메시지 주기를 증가하도록 함. 예를 들어 $\tau = 200$ ms 이고 $\alpha = 99\%$ 에 대해서 pseudo-broadcast의 경우 13.8 Hz가 broadcast의 경우에는 20Hz가 필요함. 99% 메시지가 리더로부터 군집의 멤버에게 이전 메시지로부터 200ms 이내에 도착하기 위해서 broadcast는 20Hz가 필요할 때 pseudo-broadcast를 통해 13.8Hz로 6.2Hz를 줄일 수 있음. 더 엄격한 latency를 위해서는 요구되는 비콘 주기가 더 높아지게 되지만, pseudo-broadcast는 일반적인 broadcast에 비해 항상 적은 비콘을 사용해서 요구조건을 만족시킴
- 위 그림 45는 비콘 주기에 따라 군집 주변에서 형성되는 Channel Busy Percentages (CBPs)를 보이고 있음. 군집의 추가적인 CBP는 비콘 주기에 비례하여 결정되며, broadcast와 pseudo-broadcast에서 0.1%~2.6% 정도의 차이를 보임. 이는 통신 반경 내에 단일 군집이 있을 경우이며 군집이 여러 개인 경우에는 군집의 개수만큼 곱해지게 됨

- device driver만을 수정하여 제안한 pseudo-broadcast의 구현을 보이기 위해 프로토타입 구현과 테스트를 진행함. 상업용 WAVE 장치들이 시중에 나와있지만, 장치 내부의 드라이버를 고치는 것은 어려움이 있음. 따라서 우리는 IEEE 802.11a WLAN 장치를 사용하여 구현함. IEEE 802.11a 장치는 20 MHz 채널을 사용하기 때문에 IEEE 802.11a 장치의 드라이버를 수정하여 DSRC와 같이 10 MHz 로 동작하도록 수정함. 우리는 Atheros ath5k 디바이스 드라이버를 수정하여 앞선 연구 내용을 구현함. 우리는 시뮬레이션과 같이 전송 성능이 향상되는 것을 확인하였음
- 만약 군집이 매우 길어지게 되면 리더와 최악 수신 follower 간에 높은 손실율을 겪게되고, 심지어 단일 hop 통신 반경을 넘어설 수도 있음. 이는 pseudo-broadcast가 대역폭에 대해 효율적이 못하게 하거나 심지어 불가능하게 만듦. 표 3은 군집의 길이가 커짐에 따라 PDR, CBP 그리고 IA 값의 변화에 대해서 보이고 있는데, 이때 기본 비콘 주기를 10Hz 로 설정했을 때임.

Platoon size	Avg. PDR (%)	Avg. CBP (%)	IA (ms)		
			90%	95%	99%
3	99.0	61.1	101.0	102.0	112.0
5	97.3	62.1	102.0	102.0	201.0
10	92.4	64.6	106.0	199.9	204.1
15	89.7	68.9	115.1	200.1	299.8
20	73.5	74.8	202.7	306.6	700.5
25	50.8	79.9	211.4	491.3	1,808.9

표 2. 군집의 길이에 따른 pseudo-broadcast의 성능 (10 Hz)

- 표 2에서 확인할 수 있듯이 군집에 길이가 커짐에 따라 평균 PDR 값이 감소하며, PDR을 위한 재전송으로 인해 CBP 값은 증가하게 됨. IA 또한 따라서 증가하게 되는데, 다만 IA는 여전히 단순한 broadcast보다 나은 값을 보이고 있음. 이 결과를 통해 긴 군집은 개발적인 리더를 가지는 짧은 군집들간의 결합으로 구성되어야 함을 알 수 있음. 이때 전체 군집의 리더는 중간에 위치한 다른 군집의 리더에게 pseudo-broadcast를 통해 메시지를 전달하는 형태로 동작해야 함
- 마지막으로 제안한 방식에서 긴 군집으로 인한 문제 외에도 지정된 수신자에서 수행되는 pseudonym 변경이 pseudo-broadcast 링크를 단절시키는 문제에 대한 해결 방안에 대한 연구가 필요함. 다음으로 PHY 계층에서 rate adaptation과 전송 파워 조절을 통해 군집의 메시지로 인한 대역폭 사용을

줄일 수 있을 것임. 예를 들어 매우 짧은 군집의 경우 높은 PHY rate와 약한 전송 파워를 사용함으로 비 군집 차량에 대한 영향을 줄이는 형태임. 마지막으로 pseudo-broadcasting의 전송 성능은 무선 채널 모델에 따라 달라질 수 있음. 우리는 채널모델에 따라서 pseudo-broadcasting의 성능 변화에 대한 추가적인 연구를 진행할 것임

○ 연구 결과

- pseudo-broadcast는 군집 응용의 차량 간 통신을 위한 새로운 모드임. unicast 주소를 사용하며 broadcast와 같이 전송하는 방법으로 수신자가 IEEE 802.11 구조를 가지는 프레임을 엿듣는 방식을 통해 가능하게 됨. 디바이스 드라이버를 수정하여 구현할 수 있으며 추가적인 하드웨어 업그레이드가 필요하지 않음. 이는 재전송, RTS/CTS, rate adaptation과 같은 unicast 만의 프로토콜 기능을 사용할 수 있게 함. pseudo-broadcast는 이미 재전송만을 사용하여 WAVE의 일반적인 안전 응용에서 사용되는 평범한 broadcast에 비해 packet delivery ratio와 information age 부분에서 명확한 성능 향상을 보임
- pseudo-broadcast에서 재전송으로 인해 추가적인 대역폭이 필요하지만, 정해진 information age 내에서는 전통적인 broadcast보다 더 낮음. 미래의 군집 응용에서 pseudo-broadcast가 높은 비콘 주기가 요구되는 상황에서 비 군집 차량들의 통신 성능을 해치는 것을 완화시켜 줄 것이라고 생각함

(나) 군집 주행 시 군집 내 속도 제어 알고리즘 적용 방안에 대한 연구

○ 요약

- 응용은 주행 효율 향상, 안전성 증진 등의 이점을 얻을 수 있는 차량 통신 응용 중의 하나로서, 원활한 군집 주행 응용 사용을 위해서는 고신뢰 와 저지연의 차량 통신이 보장되어야 함
- 의사-브로드캐스트 (pseudo-broadcast)는 유니캐스트를 기반으로 작동하기 때문에 수신단으로부터 피드백이 가능하다는 특징이 있으며 프레임 복구를 통한 고신뢰, 저지연의 차량 통신이 가능함
- 이처럼 의사-브로드캐스트의 피드백이 가능한 특징은 수신단의 수신 성능에 따라 송신단이 전송 채널 환경을 이해할 수 있게 하고, 따라서 속도 적응 알고리즘을 적용할 수 있게 됨
- 본 연구는 군집 주행 시 의사-브로드캐스트를 사용할 때, 속도 적응 알고리즘의 적용을 통한 성능 향상에 대해 알아보고자 하였음
- 속도 적응 알고리즘으로는 WLAN에서 가장 많이 쓰이는 ARF, AARF 그리고 이동 환경에서 좋은 성능을 보이는 RRAA를 사용함
- 시뮬레이션을 통한 실험 결과, 군집 구성 차량의 평균 패킷 수신율은 속도 적응 알고리즘을 의사-브로드캐스트에 적용하는 경우 그렇지 않을 때보다 최대 약 1.7%, 브로드캐스트에 비해 최대 약 14.1%의 성능 향상을 보임
- 또한, 안전 응용을 위해 중요한 지표인 수신 패킷 간격 또한 속도 적응 알고리즘의 적용을 통해 150 ms 이하일 평균 확률이 최대 약 2% 상승한 것을 확인할 수 있음
- 따라서 군집 주행 시 속도 적응 알고리즘을 적용하여 무선 채널에 적합한 전송 속도를 사용함으로써 의사-브로드캐스트의 향상된 고신뢰, 저지연의 통신이 가능하도록 함

○ 개요

- 차량 통신은 차량 간 통신(V2V), 차량 대 인프라 통신(V2I), 차량 대 보행자 통신(V2P) 등을 포함함. 특히 차량 간 통신을 이용한 응용은 도로 교통 흐름과 운전자의 안전 증진 등에 기여하는 바가 크다고 볼 수 있음
- 다양한 응용 중, 군집 주행은 차량 간의 좁은 거리를 유지함으로써 공기 역학을 개선하고 이에 따라 에너지 효율 향상 및 도로 효율성 개선 등의 이점을 얻을 수 있음
- 군집 내의 신뢰 있는 전송을 지원하기 위해 단일 홉 브로드캐스트가 아닌 의사-브로드캐스트를 사용하는 경우, 고신뢰와 저지연의 통신이 가능함^[11]
- 그림 46은 의사-브로드캐스트의 군집 내 사용의 예시로서, 군집의 선두 차량

이 제어 또는 의사 정보를 군집 구성 차량들에 전송하고자 할 때, 선두 차량은 군집 구성 차량 중 가장 낮은 패킷 수신률의 차량을 유니 캐스트의 목적지로 정하게 됨

- 그리고 다른 차량들은 군집의 선두와 목적 차량 간의 송/수신 패킷을 프러미스큐어스 모드¹⁾를 통해 수신함. 이때 재전송을 통한 프레임 복구가 가능한 특징이 있다.

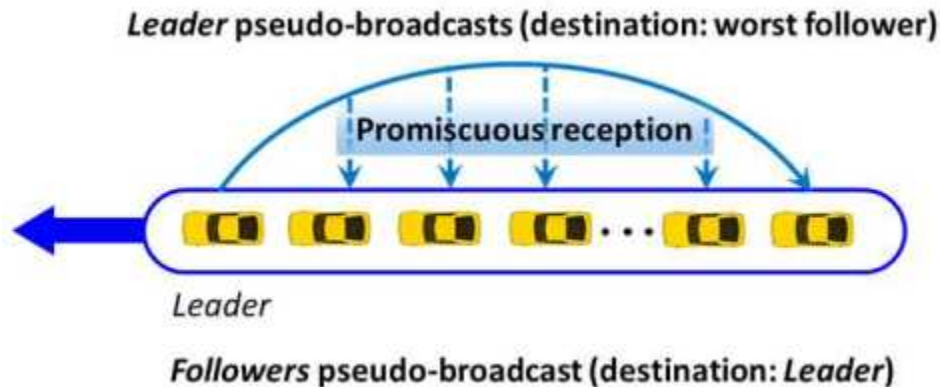


그림 46. 군집 내 의사-브로드캐스트 예

- 이러한 의사-브로드캐스트는 수신 차량으로부터 패킷 전송에 대한 피드백을 받을 수 있기 때문에 속도 적응 알고리즘의 사용이 가능함
- 본 연구는 군집 내에서 의사-브로드캐스트를 사용할 때 속도 적응 알고리즘의 적용을 통한 성능 개선에 대해 알아보고자 하였음

○ 속도 적응 알고리즘

- 속도 적응 알고리즘은 무선 채널 환경을 평가하고 이에 대응함으로써 현재 채널에 가장 적합한 전송 속도를 사용하기 위해 고안되었음. 1987년 Auto Rate Fallback (ARF) 알고리즘의 등장 이후로 현재까지 많은 연구가 진행되어 오고 있는데, 여러 알고리즘은 각 동작 방식에 따라 구분될 수 있음
- 채널 상태를 유추하기 위한 정보를 기준으로 하면 다음과 같이 구분할 수 있음. 패킷 통계를 기반한 방식의 경우 패킷의 송수신 결과에 따라 속도를 올리거나 내리는 방식으로, 이는 ARF^[12], Adaptive ARF (AARF)^[13], RRAA^[14] 등이 있음
- 또한, 신호 대 잡음비를 기반으로 하는 방식이 있으며 이는 수신 측에서의 패킷 수신 세기의 피드백을 통해 속도를 조절함. LA^[15], RBAR^[16], CHARM^[17] 등의 알고리즘이 있음
- 우리는 WLAN에서 가장 많이 사용된 ARF, AARF와 이동 환경에서 높은 성능을

1) 프러미스큐어스 모드를 통해 프레임의 목적지 주소와 상관 없이 모든 프레임을 수신할 수 있다.

보이는 RRAA를 선택하여 적용하고 시뮬레이션을 통해 성능을 평가하고 자 하였음

- 또한, IEEE 802.11p에 정의되어 있는 10 MHz 채널의 8개의 속도에 대해 작동하며 이는 각각 3, 4.5, 6, 9, 12, 18, 24, 27 Mbps 로 정의되어 있음

Parameters		Value
Simulator		QualNet 5.1
Channel	Path loss	Free space
	Shadowing	Constant/mean 4.0
	Fading	Rician (K=3)
PHY	Data rate	6 Mbps
	Tx Power	20 dBm
	Rx Sensitivity	- 85 dBm
MAC	Channel access	Continuous mode

표 3. 실험 네트워크 파라미터 값

- 실험 환경은 다음과 같음. 네트워크 시뮬레이터는 쉘넷 5.1을 사용함. 표 3은 네트워크 시뮬레이션을 위한 파라미터 값이고, 실험을 위한 차량 배치의 경우, 지름 2 km의 4차선 원형 도로에 대해 안쪽 3차선은 비군집 차량이 11 m의 차간 거리를 유지하며 10 Hz의 주기로 250 바이트의 안전 메시지를 송신함
- 이때 가장 바깥쪽 차선을 10대로 이루어진 군집 주행 차량이 90 km/h의 속력으로 지나가게 됨
- 군집 주행 차량들의 차간 거리는 주행 속력에 대해 0.5초로 이는 12.5 m이고, 따라서 비군집 차량들의 안테나 간 거리는 16 m이며 군집 차량들의 경우 17.5 m로 정의함. 또한 각각의 속도 적응 알고리즘 초기 속도값은 최댓값인 27 Mbps로 설정함
- 실험 결과는 패킷 수신율(PDR)과 수신 패킷 간격(IPG)의 결과로 나타내었음

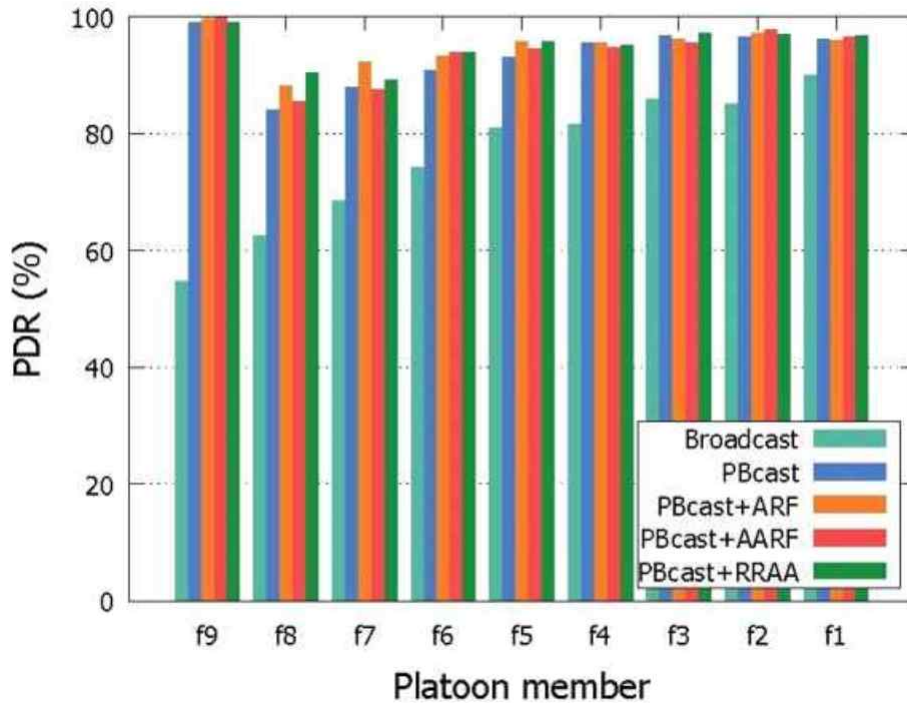


그림 47. 선두 차량으로부터의 군집 구성 차량별 패킷 수신율 (PDR)

- 그림 47는 선두 차량으로부터 받는 패킷의 수신율이고, f1부터 f9까지 선두 차량으로부터 가까운 순서의 차량을 의미함
- 9대의 군집 구성 차량에 대해 브로드캐스트의 경우 평균 약 75.9%의 PDR을 보이는 한편, 별도의 속도 적응 알고리즘을 사용하지 않는 의사-브로드캐스트의 경우 재전송을 통한 프레임 복구로부터 브로드캐스트보다 높은 약 93.3%의 평균 PDR을 보임
- 이때 각 속도 적응 알고리즘을 적용하는 경우 ARF, AARF, RRAA 순서대로 약 94.9, 94.0, 95.0%의 평균 PDR 결과를 알 수 있는데, 이는 수신단의 피드백을 통해 군집 주행 시 무선채널 환경에 적합한 속도를 사용했기 때문임
- 그림 48는 특정 수신 패킷 간격 이내를 만족하는 평균 확률과 95% 신뢰구간을 나타낸 결과임. 확률이 높을수록 지연이 작음을 의미하고 정확한 통신이 가능함을 의미함. 또한, 낮은 지연은 주변 차량을 인지하는 측정 오차를 줄일 수 있기 때문에 안전 응용에 있어 더 중요한 의미를 갖는다.

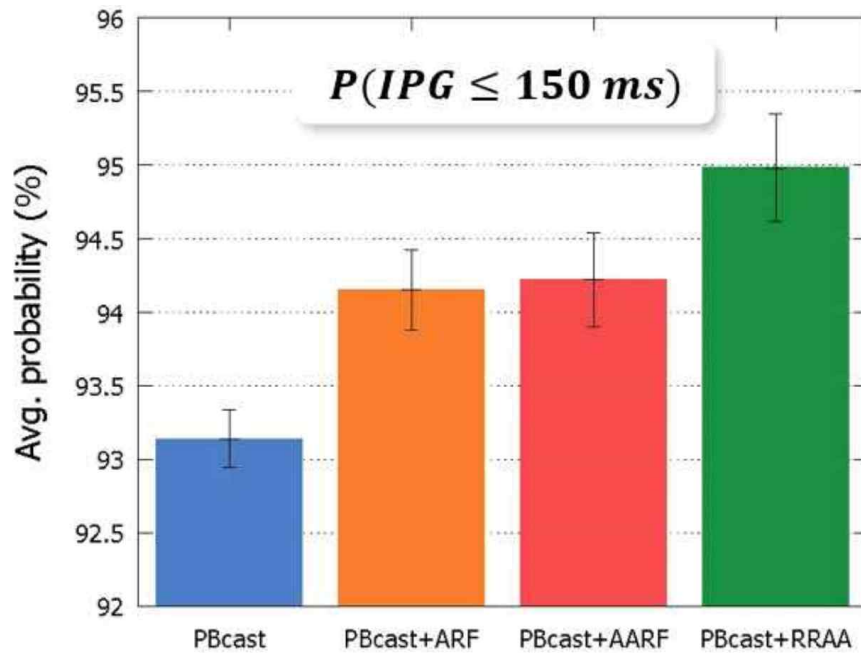


그림 48. 특정 수신 패킷 간격 (IPG)를 만족할 평균 확률

- 실험 결과, 속도 적응 알고리즘을 사용하지 않을 때보다 ARF, AARF, RRAA 순서대로 적용했을 때 약 1.0, 1.2, 1.9%의 평균 IPG 상승 결과를 보임

○ 연구 결과

- 우리 연구는 군집 주행을 위해 의사-브로드캐스트를 사용할 때, 속도 적응 알고리즘을 적용하고 그에 대한 성능 개선을 확인하였음
- 속도 적응 알고리즘은 의사-브로드캐스트가 수신단으로부터 피드백이 가능하다는 특징을 통해 적용 가능함
- 성능 평가를 위해 패킷 수신 기반의 속도 적응 알고리즘인 ARF, AARF와 이동 환경에서 유리한 RRAA 알고리즘을 사용하였고, 실험 결과 평균 패킷 수신율은 브로드캐스트에 비해 최대 약 14.1%, 속도 적응 알고리즘이 없는 의사-브로드캐스트에 비해 최대 약 1.7%의 성능 향상이 있었음
- 수신 패킷 간격의 경우 150 ms 이하일 평균 확률이 속도 적응 알고리즘을 적용하는 경우 최대 약 2% 상승한 것을 확인할 수 있음
- 따라서 군집 주행 시 속도 적응 알고리즘을 적용하여 무선 채널에 적합한 전송 속도를 사용함으로써 의사-브로드캐스트의 향상된 고신뢰, 저지연의 통신이 가능하도록 함

(다) J2945 표준의 혼잡 제어에서 정보 연령 (Information Age)을 향상시키기 위한 연구

○ 요약

- 자동차 기술자 협회 (The Society of Automotive Engineers, SAE)의 J2945 표준은 차량 안전 통신의 기본 안전 메시지 (Basic Safety Message, BSM) 전송을 위한 무선 채널 혼잡 제어 알고리즘을 규정하고 있음
- 이 알고리즘은 송신 (Tx) 전력 (power) 및 속도 (rate) 제어 (control)를 사용하지만 Tx power control이 대부분의 현실적인 차량 밀도에서 거의 작동하지 않는다는 것을 발견함
- 이러한 현상이 나타나는 이유와 Tx power와 rate 모두를 제어 메커니즘에 활용하는 대안을 제시함
- 구체적으로, 대안은 Tx power 제어가 먼저 한계에 도달한 다음, Tx rate 제어를 함으로써 추가적인 혼잡을 다루도록 하는 방법임
- 제안하는 대안은 Tx power 제어가 작동하지 않는 문제를 해결할 뿐만 아니라, 가장 중요한 안전거리 이내 차량의 정보 연령 (Information Age)을 향상시킴

○ 개요

- 차량 안전 통신에서 차량이 주변 차량 움직임의 추적, 단기 예측을 용이하게 함으로써 충돌 위험을 줄이기 위해서는 위치, 속도, 가속 및 포제 등과 같은 정보 [4]를 포함하는 BSM (Basic Safety Messages)이 주기적으로 교환되어야 함
- SAE J2945 표준 [4]은 IEEE 무선 액세스 기반의 차량 환경 (Wireless Access in Vehicular Environments, WAVE) 아키텍처에서 차량 간 (V2V) 통신의 온보드 시스템 요구사항 (on-board system requirement)을 규정함
- 특히, Dedicated Short Range Communication (DSRC) 채널이 혼잡 할 때 BSM 전송을 위한 Tx power 및 rate를 조절하는 혼잡 제어 알고리즘을 지정함
- 이 알고리즘은 두 가지 입력 매개 변수인 채널 사용률 (Channel Busy Percentage, CBP)과 차량 밀도 (Vehicle Density, VD)를 평탄화 (smoothing) 하여 사용함
- CBP는 DSRC 채널이 통화중 (busy)임을 감지하는 시간의 비율이고, VD는 수신한 BSM을 통해 인지한 반경 100m 이내의 주변 차량 수 (vPERRange)로 smoothing 함
- 특히, VD는 100 ms (vTxRateCntrlInt)마다 업데이트 됨
($VD = 0.05 \times n + 0.95 \times VD$)
- 여기서 n은 지난 100ms 간격으로 BSM에서 계산 된 100 m 이내의 차량 수이

고, smoothing window는 1 초임

- 다음 그림 49와 같이 알고리즘은 CBP가 50 % (vMinChanUtil)보다 높으면 Tx power (P_{tx})를 줄이기 시작하고 VD가 25 (vDensityCoefficient)보다 클 때 다음과 같이 Tx rate (R_{tx})를 떨어뜨리기 시작함

$$R_{tx} \text{ (Hz)} = \begin{cases} 10 & (VD \leq 25) \\ \frac{250}{VD} & (25 < VD < 150) \\ 1.67 & (150 \leq VD) \end{cases} \quad (1)$$

$$P_{tx} \text{ (dBm)} = \begin{cases} 20 & (CBP \leq 50\%) \\ 20 - \frac{(CBP - 50\%)}{3} & (50\% < CBP < 80\%) \\ 10 & (80\% \leq CBP) \end{cases} \quad (2)$$

그림 49. SAE J2945 표준에 따른 Tx power (P_{tx}) 및 rate (R_{tx}) 결정

- 마지막으로, 호스트 차량은 다음 그림 50와 같이 100 미터 반경 (vPERRange) 이내의 주변 차량에 의한 추정된 평균 추적 오차 e (미터)에 기초하여 스케줄링된 (scheduled) BSM 전송 이전의 BSM 전송 (즉시 전송) 확률을 계산함

$$p(e) = \begin{cases} 0 & (e \leq 0.2) \\ 1 - \exp(-75 \cdot |e - 0.2|^2) & (0.2 < e < 0.5) \\ 1 & (e \geq 0.5) \end{cases} \quad (3)$$

그림 50. SAE J2945 표준에 따른 BSM 전송 확률 계산

- 이 제어 알고리즘의 주목할 측면은 VD와 CBP가 100 ms (vCBPMeasInt) [4]마다 시간 t 에서 동시 업데이트 되지만 알고리즘이 서로 다른 시간 인스턴스에서 P_{tx} 와 R_{tx} 를 결정한다는 것임
- 첫째, 그림 49에서, Tx rate 제어는 R_{tx} 를 결정하고, $t + R_{tx}^{-1}$ 에서 다음 BSM 송신을 스케줄링 함
- 다음, 이 스케줄링 된 BSM 전송이 실제로 발생할 때, Tx power 제어는 그림 49에 따라 P_{tx} 를 설정함
- 두 작업 간의 시간 차이는 단지 초 단위 일 수 있지만, 이 모호한 측면은 제어 다이내믹스 (control dynamics)에 중대하고 잠재적이며 해로운 영향을 미침
- VD의 가장 현실적인 값의 경우, R_{tx} 감소는 Tx power 제어가 참여해야 할 시간, 즉 $t + R_{tx}^{-1}$ 에서 CBP를 이미 50 % 미만으로 감소시킬 수 있음

- 결과적으로, Tx power 제어는 CBP가 너무 낮아 P_{tx} 를 20 dBm (vRPM_{Max}) 이하로 감소시킬 수 없기 때문에 대부분 동작하지 않는 휴면 상태가 됨
- Tx rate 제어가 효과적이지만 여전히 그런 일방적 조작은 다음에서 구체적으로 설명될 바람직하지 않은 결과를 초래할 수 있음
- 또한, 다음에서 Tx power 제어의 역할을 강화하는 대안을 논의 할 것이고, 이 대안이 Tx power 제어를 더 잘 활용하는 데 도움이 될뿐만 아니라 가장 중요한 안전거리에서 차량의 정보 연령 성능 [18]을 향상시키는 영향을 보여줄 것임
- 비교적 최근 표준화된 J2945 혼잡 제어 알고리즘은 다이내믹스 (dynamics) 측면에서 철저히 분석되지 않았음
- 최근에, Hsu et al. [19]는 알고리즘에 대한 테스트 방법을 제안하였고, 특히 10 Hz로 BSM을 전송하는 240-320 대의 차량은 50-80 %, 400 대의 차량은 80 % 이상의 CBP를 생산하는 것을 보여줌
- Rostami et al. [20]은 알고리즘이 목표 된 50-80 % 범위 내에서 실제로 CBP를 제어한다는 것을 보여 주었고, 통신 거리가 크지 (예 : 100m 이상) 않은 경우, 정보 연령이 National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) [21]에서 권장 한대로 90 % 이상이 650 ms 미만인 최소 성능 가이드 라인을 충족하는 것으로 나타남
- 그러나 이 연구는 또한 최악의 경우에 최소 성능 가이드 라인을 충족시키지 못하는 정보 연령이 많은 것을 보여줌
- 우리 연구는 이 현상에 대한 이유를 밝혀내고 치료 방법을 제안함

○ J2945 표준에서의 부적절한 Tx power 제어

- 그림 51의 알고리즘 1과 같이 J2945 알고리즘의 Tx rate 제어 요소는 100 ms (vTxRateCntrlInt)마다 실행됨

Algorithm 1 SAE J2945 Congestion Control: Scheduling

```
1: { $t$ : CurrentTime}           ▷ Rate control executes every
    100 ms
2: { $T_{next}$ : NextScheduledMsgTime}
3: { $T_{last}$ : LastTxTime}
4: if CriticalEvent || LargeTrackingError then
5:    $T_{next} = t$                  ▷ Cancel schedule and send BSM
    immediately
6: else if  $T_{next} - (T_{last} + R_{tx}^{-1}) \geq 25$  ms then  ▷  $R_{tx}$  from
    Eq. (1)
7:    $T_{next} = \max(t, T_{last} + R_{tx}^{-1})$   ▷ Update schedule:  $R_{tx}$ 
    increased
8: else
9:   Send as previously scheduled  ▷ Do not change  $T_{next}$ 
10: end if
```

그림 51. SAE J2945 혼잡 제어의 스케줄링 알고리즘

- 호스트 차량이 주변 차량에 알려야하거나 추적 오류가 사전 설정된 임계 값 (그림 50) 이상이어야 하는 특별한 경우가 발생하면 즉각적인 BSM 전송이 특정 조건 하에서 스케줄되고 NextScheduledMsgTime에 이전에 예정된 전송은 취소됨
- 반면, 관찰된 VD가 감소하여 R_{tx} 가 그림 51과 같이 증가해야하는 경우에 새로운 예정 시간 $T_{last} + R_{tx}^{-1}$ 가 현재 예정된 시간 T_{next} 보다 25 ms ($vRescheduleTh$) 이상 빠른지를 검사하여 그렇다면 기존 BSM 전송 일정을 취소하고 보다 빠른 새로운 BSM 전송 일정을 추가함
- R_{tx} 가 감소되어야하는 경우, 현재 예정된 전송을 끝낸 후에 이를 감소시킴
- T_{next} 가 설정된 후, Tx power 제어는 $t = T_{next}$ 에서 호출되어 P_{tx} 를 결정함
- 그 다음, 다음과 같은 갱신이 이루어짐 : $T_{last} = t$, $T_{next} = T_{last} + R_{tx}^{-1} + \gamma$, $|\gamma| \leq 5$ ms ($vTxRand$)
- R_{tx} 가 대응하는 P_{tx} 보다 먼저 결정된다는 사실은 중요함
- R_{tx} 10 Hz이므로 P_{tx} 결정은 R_{tx} 결정 후 100ms 이내에 발생할 수 없음
- 사실, R_{tx} 와 P_{tx} 측정 사이에는 여러 CBP 측정 간격 ($vCBPMeasInt = 100ms$)이 있을 수 있음
- 혼잡이 악화되고 R_{tx} 가 감소 할 때를 고려해 보면, 예를 들어, $R_{tx}^{-1} = 240$ ms이면 시스템은 $t + 100$ 및 $t + 200$ ms에서 CBP를 측정함 (그림 52)

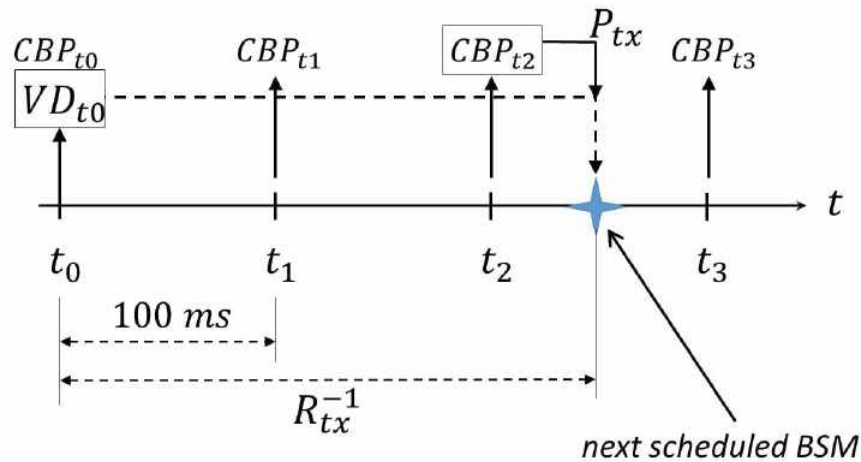


그림 52. J2945 혼잡 제어의 BSM 스케줄링 및 power 결정

- t_0 에서 증가 된 VD를 관측하는 차량에서 모든 R_{tx} 가 감소하면 근접 거리에 있는 CBP는 다음 측정 값, 즉 $CBP_{t0} > CBP_{t1} > CBP_{t2}$ 에 걸쳐 계속 감소함
- 그러면 BSM 직전의 $CBP_{t2} (< CBP_{t0})$ 전송은 BSM에 대한 P_{tx} 를 결정하고, 따라서 Tx power 및 rate 제어는 상이한 혼잡 레벨을 인식 할 수 있음
- Qualnet 5.1에 J2945 혼잡 제어 알고리즘을 구현하여 실험한 시뮬레이션을 통해서 위와 같이 상이한 혼잡 레벨 인식의 영향을 알 수 있음
- 무선 채널 환경에서 Path loss 모델은 two-ray ground를 사용하였고, 일정한 4 dB의 shadowing이 있고 Rayleigh fading 환경을 가정함
- 데이터 속도 (data rate)는 6 Mbps를 사용하고 BSM 크기로 250 바이트임
- 가장자리 효과가 없는 혼잡 한 시나리오를 만들기 위해 차량을 반경 1km의 6 레인 원형 트랙에서 움직이도록 하고 VD를 20에서 400으로 변화시킴
- 주어진 VD 값을 평균으로 하는 지수 분포를 차간 거리로 사용하고, 각 차량은 30-80 km/h의 속도로 원형 트랙을 따라 이동하며, 각 레인의 차량은 인접한 외부 레인의 차량보다 10 km/h 더 빠름

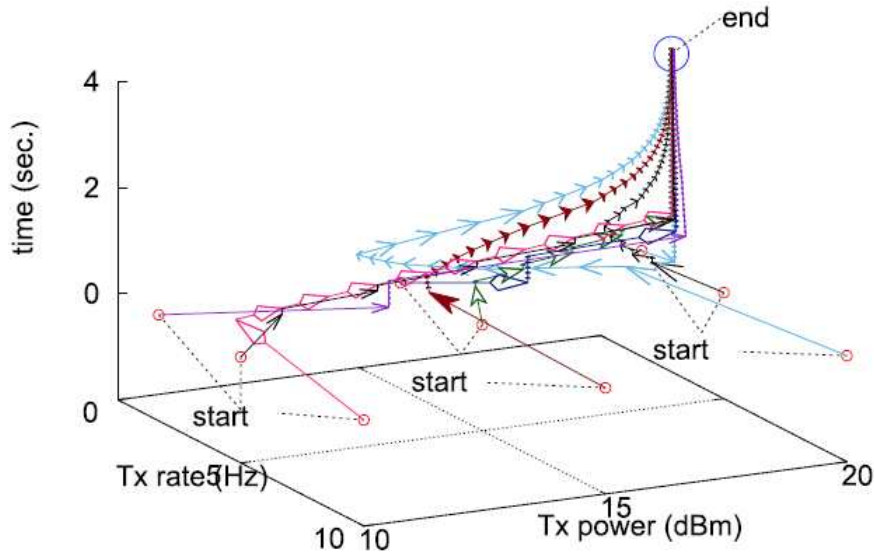


그림 53. $VD = 90$ 에서의 높은 power와 낮은 rate로 수렴하는 J2945 알고리즘의 경향

- 그림 53은 초기 조건 $R_{tx} \in \{1.67, 5, 10\}$ (Hz)과 $P_{tx} \in \{10, 15, 20\}$ (dBm)이 짝을 이루는 9 가지 다른 조합 (그림에 “start”로 표시됨)으로부터의 $VD = 90$ 인 경우의 궤도 $[R_{tx}, P_{tx}](t)$ 를 100 ms 시간 간격으로 나타냄
- 각 궤도 (trajectory)는 시작하는 초기 조건과 상관없이 “end”로 표시된 같은 지점으로 $([R_{tx}, P_{tx}](\infty) \approx [2.88, 20.0])$ 수렴함
- $R_{tx}=10$ Hz 인 3 개의 시작점에 대해서만 J2945 알고리즘은 P_{tx} 를 일시적으로 감소시키지만 곧 20 dBm으로 되돌아감

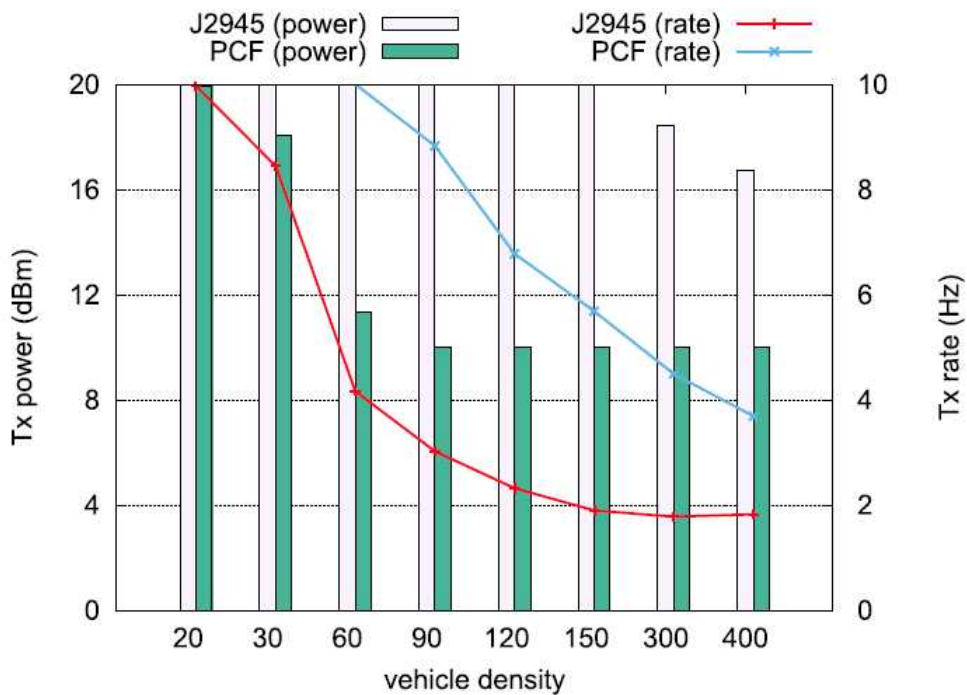


그림 54. J2945와 PCF에서의 평균 Tx power 및 rate

- J2945 알고리즘이 낮은 Tx rate과 높은 (종종 최대) Tx power 전송으로 수렴하는 강한 경향성은 특정 VD에만 국한된 것이 아님
- 그림 53은 위와 같은 성향이 대부분의 실제 차량 교통 밀도에서 일관되게 나타남을 보여줌
- Tx power 제어의 부적절하게 작동함으로 인해 Tx rate는 일방적으로 감소되고, 결과적으로 차량으로부터의 연속적인 BSM 메시지들 (즉, Information Age) 사이의 평균 시간차는 바람직하지 않게 높아질 수 있음
- 명백하게도, 덜 빈번한 주변 차량 정보의 업데이트는 이웃 차량 위치 추적에 나쁜 영향을 미치고 궁극적으로 차량 간 충돌 위험을 증가시킬 수 있음

○ Tx power 제어 강화

- Tx power 제어를 우선함으로써 부적절한 Tx power 제어 문제를 해결할 수 있음
- 혼잡 상황에서 Power Control First (PCF)라는 체계는 Tx power를 먼저 줄이고, 최소 (10 dBm)까지 줄인 후에도 CBP가 80 %를 넘으면 Tx rate를 10 Hz에서 내림으로써 혼잡을 극복하기 시작함
- P_{tx}를 보다 적극적으로 감소하면 J2945에 비해 적은 차량이 들을 수 있지만, PCF에서 보다 커지는 Tx rate가 이를 보상 할 수 있음
- J2945와 동일한 채널 리소스를 사용하도록 PCF를 설계하기 위하여 J2945 알고리즘에 의해 생성 된 CBP를 $C_{2945} = h(P_{tx}) \cdot VD \cdot R_{tx}(VD)$ 로 함
- $h(P_{tx})$ 는 주어진 P_{tx} 가 CBP에 기여하는 양을 결정하고 나머지 항은 J2945 Tx rate 제어를 나타냄
- J2945 알고리즘을 시뮬레이션함으로써 경험적으로 $h(P_{tx}) = C_{2945} / (VD \cdot R_{tx})$ 를 얻을 수 있음
- J2945 Tx rate 제어를 PCF에서 생성할 CBP와 동등한 Tx power 제어로 변환하기 위해, CBP를 동일하게 만듦 ($C_{pcf} = h(P_{tx}^{pcf}) \cdot VD \cdot 10 = C_{2945}$)
- J2945의 Tx power는 대부분의 실제 VD에서 20dBm이므로 이 VD에 대해 Tx rate를 10 Hz로 설정하려면 다음을 수행해야 함 (그림 55)

$$C_{2945} = h(20) \cdot VD \cdot R_{tx}(VD) = h(P_{tx}^{pcf}) \cdot VD \cdot 10$$

$$\Rightarrow P_{tx}^{pcf}(VD) = h^{-1}\{h(20) \cdot R_{tx}(VD)/10\}$$

그림 55. 동일한 채널 리소스를 사용하기 위한 PCF에서의 Tx power 설정

- 알고리즘이 Tx power를 최소 (10 dBm)로 할 때 Tx rate를 설정하기 위해 위 식 (CBP-equivalence)으로부터 다시 유도하지만 이번에는 $P_{tx}^{pcf}=10$ dBm으로 설정하여 $R_{tx}^{pcf}(VD)=h(20)/h(10) \cdot R_{tx}(VD)$ 를 얻음
- J2945 알고리즘과 PCF의 비교를 위해 Qualnet 5.1 시뮬레이터에서 PCF를 구현함
- 그림 54는 차량이 J2945 및 PCF에서 BSM을 전송하는 평균 Tx power 및 rate를 보여줌
- VD=20 에서는 채널이 아직 혼잡하지 않기 때문에 최대 Tx power와 rate를 사용함
- VD가 증가함에 따라 J2945에서 P_{tx} 가 최대 값을 유지하는 동안 R_{tx} 만이 최소값과 추적 오류 유도 전송을 더한 값으로 떨어지고 R_{tx} 가 VD 300에서 최소값에 도달 할 때만 P_{tx} 가 감소되기 시작함
- 대조적으로 PCF는 $VD \leq 60$ 에 대해 R_{tx}^{pcf} 를 최대로 유지하면서 P_{tx}^{pcf} 를 줄임으로써 증가하는 혼잡에 대처하는 것으로 나타남
- 그 이상의 경우 P_{tx}^{pcf} 는 최소값 (vRPMIn)에 도달하여 PCF는 R_{tx}^{pcf} 를 줄이기 시작함
- J2945가 VD=300에서 P_{tx} 를 마침내 줄이기 시작했지만 (매우 약간만), 매우 높은 VD는 거의 비현실적으로 도로에 차량이 꽉 차있을 때만 가능할 것임
- 테스트 구성으로 권장되는 10 미터의 차량 간격은 VD = 300 및 VD = 400에서 15~20 차로의 도로를 필요로 함
- 따라서 보다 현실적인 교통 혼잡 시나리오의 경우 J2945보다 응답 속도가 빠른 Tx power 제어가 바람직함
- 그림 54에서 PCF에 의한 2 개 (Tx power 및 rate)의 제어가 J2945보다 공평하게 이용되는 것을 주목할 필요가 있음

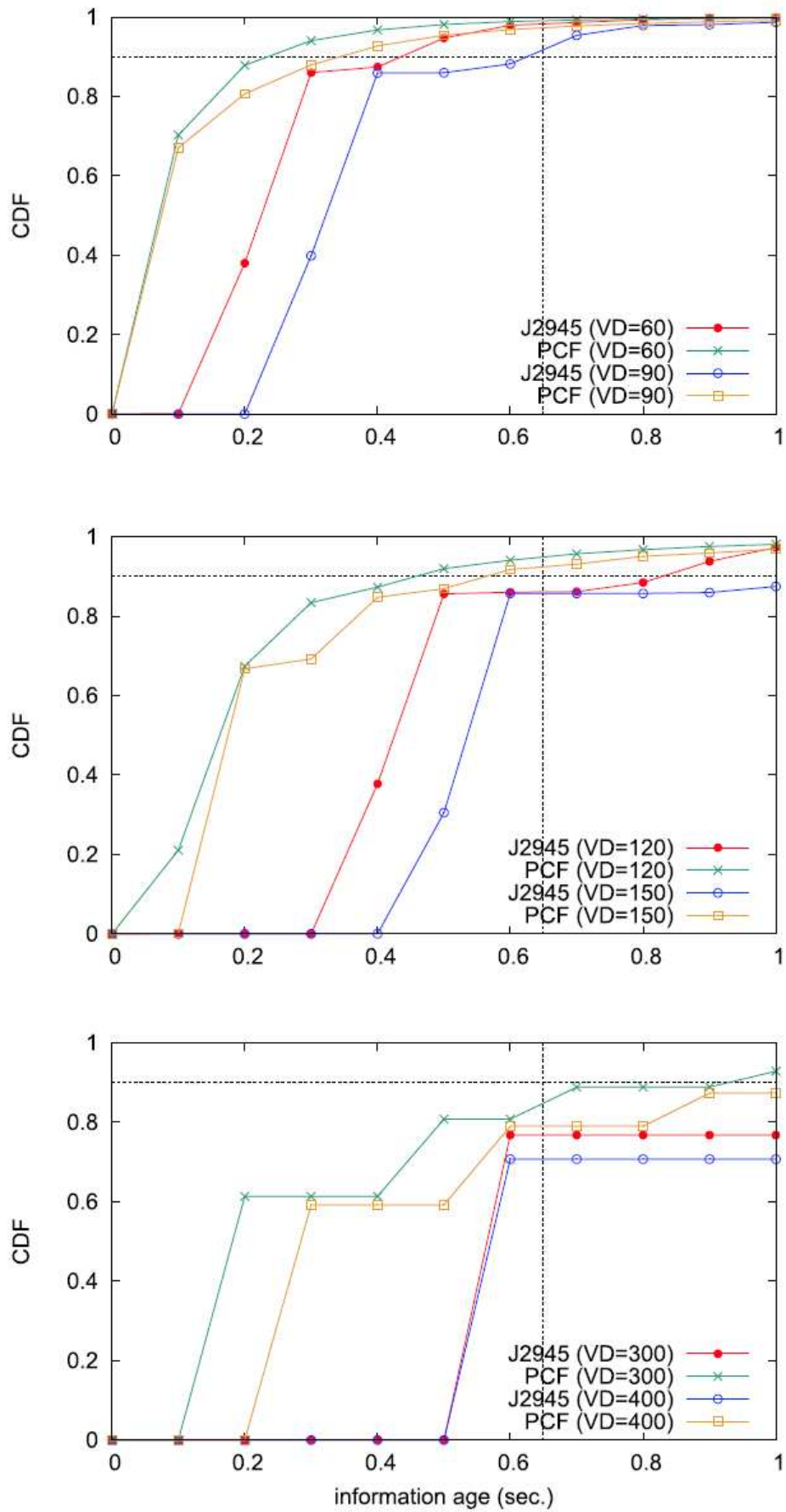


그림 56. J2945와 PCF에서의 VD에 따른 Information Age 비교

- 두 컨트롤을 광범위하게 (즉, 전체 P_{tx} 범위와 R_{tx} 범위의 대부분을 사용함) 사용함으로써 PCF는 J2945보다 훨씬 작은 Information Age를 생산함
- 그림 56은 100m 이내에 차량수를 의미하는 VD의 함수로서 두 알고리즘의 Information Age를 보여줌
- J2945에서는 이 거리가 중요한 충돌 위험임을 나타내는 범위 (vPERRange) 내에서만 차량에 대해 위치 추적이 수행되기 때문에 100 m 거리가 중요함
- NHTSA는 모든 메시지의 90 %가 안전 임계 거리에서 650 ms 이하의 정보 수명을 유지할 것을 권장함
- J2945 알고리즘은 $VD \leq 90$ 과 같은 상대적으로 약한 혼잡도 수준에서만 가이드라인을 충족함
- PCF는 $VD \leq 150$ 으로 범위를 확장하여 더 나은 성능을 보여줌
- 그러나 가이드라인을 거의 충족하지 못하는 일부 V2V 응용 프로그램에 대한 충분하지 않을 수 있음
- 예를 들어, 전방 충돌 경고 (FCW) 애플리케이션에서 J2945에 의해 허용된 600 ms와 같은 큰 정보 수명은 특히 차량 속도가 40 mph 미만인 경우 충돌 위험을 증가시킬 수 있음 [22]
- 이러한 점에서 PCF는 J2945에 비해 크게 개선되었음
- 예를 들어 PCF를 사용하는 $VD=150$ 의 중간 (median) Information Age는 200 ms 미만이지만 J2945는 500 ms를 초과함
- 이와 같이 PCF는 모든 차량 밀도에서 J2945를 능가하며, 혼잡이 악화됨에 따라 두 알고리즘 간의 성능 차이가 늘어남

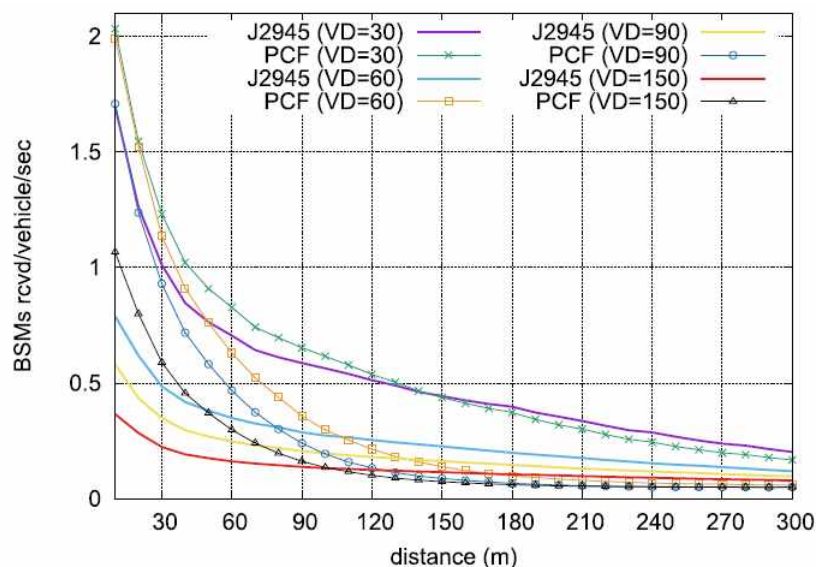


그림 57. J2945와 PCF에서 주변차량이 수신한 초당 BSM 개수

- PCF의 보다 나은 Information Age 성능은 Tx rate 제어의 결과로 더 많은 수의 BSM을 전송하는데 기인함
- Tx power 제어 덕분에 CBP를 줄일 수 있으므로 더 많은 채널 리소스를 사용하지 않고도 PCF는 Tx rate를 높일 수 있음
- 그림 57는 송신기로부터의 거리의 함수로서 초당 이웃 차량에 의해 수신된 평균 BSM 수를 나타냄 (10 m 빈 사용)
- J2945에서는 Tx rate를 최소로 낮추고 충돌을 피함으로써 정보 수명 증가의 비용으로 Packet Delivery Ratio (PDR)을 임의로 올릴 수 있기 때문에 PDR을 사용하지 않음
- 그림 57에서 빈에 n 개의 차량이 있고 기준 차량에서 x 개의 BSM을 공동으로 수신 한 경우 플롯 된 값은 x/n 임
- J2945가 PCF의 성능을 초과하는 거리의 값은 혼잡이 악화됨에 따라 140 m에서 100 m까지 점차 감소함
- 그러나 이 교차점을 너머의 숫자 차이는 크지 않으나, 대조적으로 교차 지점 내의 차이는 PCF가 위쪽에 있을 때, 특히 더 가까이에 가까울수록 즉, 안전 위험이 더 큰 근거리에서 훨씬 큼
- 혼잡이 차량 속도가 현저하게 감소한다는 것을 의미 [23]하기 때문에, 더 가까운 거리에서 더 많은 BSM을 제공하는 것이 안전 목적에 더 중요함 [24]
- 이 실험 결과는 현재 J2945 표준보다 Tx power 제어와 관련하여 더 적극적으로 개입하는 것의 중요성을 보여줌
- 특히 현재 J2945 알고리즘에서 허용되는 낮은 Tx rate이 더 긴급한 안전 애플리케이션에 적합하지 않을 수 있다는 경고가 있음
- PCF의 BSM 전달 성능은 장거리 (NHTSA가 최대 150 m를 규정 [25])에 비해 J2945보다 낮을 수 있지만, 차량 속도와 차량 밀도의 관계는 짧은 거리에서의 BSM 전달 성능이 차량 밀도가 높은 경우에서도 가장 중요하다는 것을 의미하는데 이는 이러한 밀도에서 차량 속도가 매우 낮기 때문임
- 마지막으로, 더 심한 shadowing은 Tx power 감소로 인해 PCF 성능이 J2945보다 더 급격히 저하 될 수 있음
- 두 배 및 네 배 더 높은 shadowing (예 : 7dB 및 10dB)이 있는 공간에 대해서도 PCF는 가장 높은 혼잡 상황에서도 50 m 이내의 거리에서는 J2945보다 여전히 뛰어난 성능을 보임

○ 연구 결과

- SAE J2945 혼잡 제어에서 Tx power 제어는 혼잡이 매우 높은 수준에 도달 할 때까지 동작하지 못함
- 실제로 Tx rate 제어가 동작하여 BSM을 덜 빈번하게 전송하도록 함

- 이는 BSM 사이의 시간 간격이 넓어지기 때문에 Information Age 성능의 저하로 이어짐
- Tx power 제어에 우선순위를 부여함으로써 두 제어 (Tx power 및 rate)가 보다 균형 잡힌 방식으로 작동하고 안전이 가장 중요한 거리에서 더 향상된 Information Age를 생성함을 보임

○ 특허 출원 내용

- 발명의 명칭
 - ☞ 국문 - 차량 간 통신에서 혼잡을 제어하기 위한 주기적 메시지 전송 설정 방법 및 장치
 - ☞ 영문 - Method and Apparatus for setting periodic message transmission for controlling congestion in vehicle-to-vehicle communication
- 기술 분야
 - ☞ 본 발명의 실시예들은 차량 간 통신에서 차량 위치 및 속도 등과 같은 차량 정보를 포함하는 BSM(Basic Safety Message)을 전송하는 무선 채널에서, 통신 혼잡을 제어하기 위한 주기적 메시지 전송 설정 방법 및 장치에 관한 것임
- 발명의 배경이 되는 기술
 - ☞ VANET (Vehicular Ad hoc NETwork)은 인프라스트럭처(infrastructure)가 존재하지 않더라도 말단 사용자들이 스스로 네트워크를 구성해서 서로 통신을 주고받는 네트워크를 의미함
 - ☞ VANET의 통신 링크를 지칭하는 V2X 통신은 크게 V2I (Vehicle-to-Infrastructure)와 V2V (Vehicle-to-Vehicle) 통신으로 나뉨
 - ☞ 특히, V2V 통신 기술은 차량 간에 무선으로 정보를 주고받는 기술을 의미함
 - ☞ V2V 통신 기술은 이동 중이거나 정차 중인 차량들 간의 신호 또는 데이터를 송수신하는 무선 통신 기술로서, 일정 범위 내에 있는 차량들이 무선 통신을 통해 각자의 위치/속도 등의 차량 정보 및 주변 교통 상황 정보, 즉 BSM(Basic Safety Message)를 주고받으며, 갑작스러운 교통사고를 예방하는 시스템임
 - ☞ 그러나, 일정 범위 안에 존재하는 차량의 개수가 증가하는 경우 전송하려는 BSM이 많아지게 되고, 무선 채널이 혼잡해짐에 따라 사고 방지를 위해 활용할 수 있는 BSM 수신이 실패하는 경우가 많아지는 문제점이 발생할 수 있음
 - ☞ 특히, SAE J2945 혼잡 제어 알고리즘은 메시지 전송을 위해 Channel Busy

Percentage (CBP)에 기초하여 메시지의 전송 세기(Tx power)를 설정하고, 차량 밀도에 기초하여 메시지의 전송률 (Tx rate)를 설정함 (그림 58)

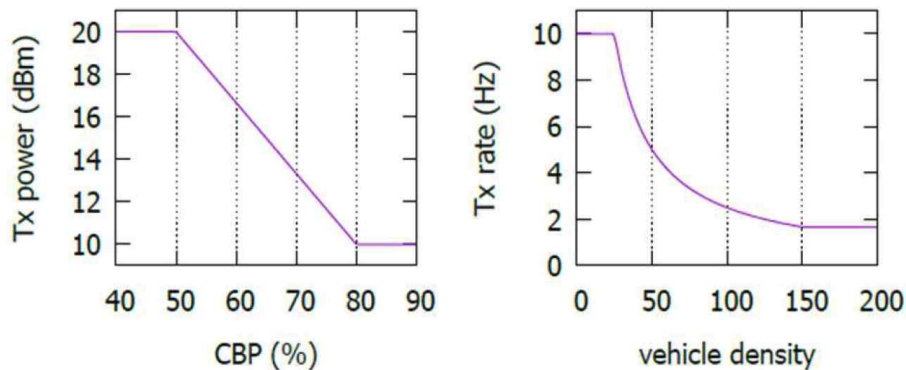


그림 58. SAE J2945 혼잡 제어 알고리즘에 의한 Tx power 및 rate 결정

☞ 이 때, 차량의 개수가 증가하여 차량 밀도가 증가하는 경우, 전송 세기는 감소하지 않고 전송률만 감소하게 되는데, 이로 인하여 CBP가 낮아지게 되어 전송 세기는 여전히 감소하지 않고 불필요하게 높은 전송 세기를 사용하는 문제점이 있음 (그림 59)

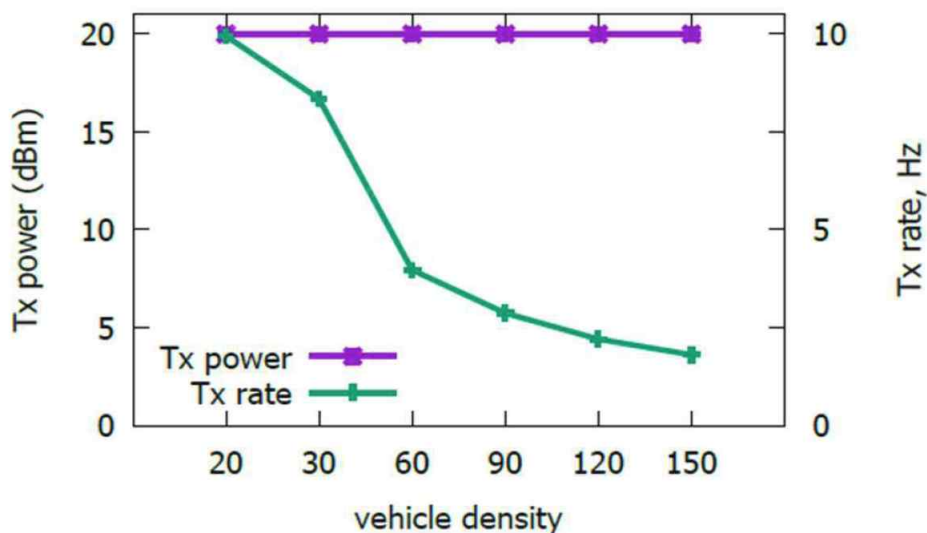


그림 59. Vehicle density (VD)에 따른 SAE J2945 기반 Tx power 및 rate

- 해결하고자 하는 과제

☞ 상기한 바와 같은 종래기술의 문제점을 해결하기 위해, 본 발명에서는 Basic Safety Message (BSM)의 수신률 및 근거리에서 Inter-Packet Gap (IPG)를 향상 시켜 차량 간 사고 발생의 위험을 감소시키는 차량 간 통신

에서 혼잡을 제어하기 위한 주기적 메시지 전송 설정 방법 및 장치를 제안하고자 함

- 과제의 해결 수단

- ☞ 상기한 목적을 달성하기 위해 본 발명의 바람직한 일 실시예에 따르면, 프로세서가 포함된 장치에서 수행되며, 차량 간 통신에서 혼잡을 제어하기 위한 주기적 메시지 전송 설정 방법에 있어서, 기 설정된 반경 내에서의 차량 밀도를 산출하는 단계 및 상기 차량 밀도에 기초하여 상기 주기적 메시지의 전송 세기 및 상기 주기적 메시지의 전송률을 설정하는 단계를 포함하는 주기적 메시지 전송 설정 방법이 제공됨
- ☞ 상기 설정하는 단계는 상기 주기적 메시지의 전송률을 기 설정된 전송률로 고정하고, 상기 주기적 메시지의 전송 세기를 설정할 수 있음
- ☞ 상기 설정하는 단계는 상기 차량 밀도가 증가할수록 상기 주기적 메시지의 전송 세기가 감소되도록 상기 주기적 메시지의 전송 세기를 설정할 수 있음
- ☞ 상기 설정하는 단계는 상기 차량 밀도가 기 설정된 기준 차량 밀도 이하인 경우, 상기 주기적 메시지의 전송률을 기 설정된 전송률로 고정하고, 상기 주기적 메시지의 전송 세기를 설정하고, 상기 차량 밀도가 상기 기준 차량 밀도를 초과하는 경우, 상기 주기적 메시지의 전송 세기를 고정하고, 상기 주기적 메시지의 전송률을 설정할 수 있음
- ☞ 상기 설정하는 단계는, 상기 차량 밀도가 상기 기준 차량 밀도 이하인 경우, 상기 차량 밀도가 증가할수록 상기 주기적 메시지의 전송 세기가 감소되도록 상기 주기적 메시지의 전송 세기를 설정하고, 상기 차량 밀도가 상기 기준 차량 밀도를 초과하는 경우, 상기 차량 밀도가 증가할수록 상기 주기적 메시지의 전송률이 감소 되도록 상기 주기적 메시지의 전송률을 설정할 수 있음

- 발명의 효과

- ☞ 본 발명에 따르면, BSM의 수신률 및 근거리에서 IPG를 향상시켜 차량 간 사고 발생의 위험을 감소시키는 장점이 있음

- 도면의 간단한 설명

- ☞ 그림 58 및 그림 59는 종래 기술을 설명하기 위한 도면임
- ☞ 그림 60은 본 발명의 일 실시예에 따른 주기적 메시지 전송 설정 장치의 개략적인 구성을 도시한 도면임
- ☞ 그림 61은 본 발명의 일 실시예에 따른 주기적 메시지 전송 설정 방법의 개략적인 흐름도를 도시한 도면임
- ☞ 그림 62는 종래 기술과 본 발명의 실시예들의 구성을 비교하기 위한 도면임

☞ 그림 63 및 그림 64은 본 발명의 효과를 설명하기 위한 도면임

300

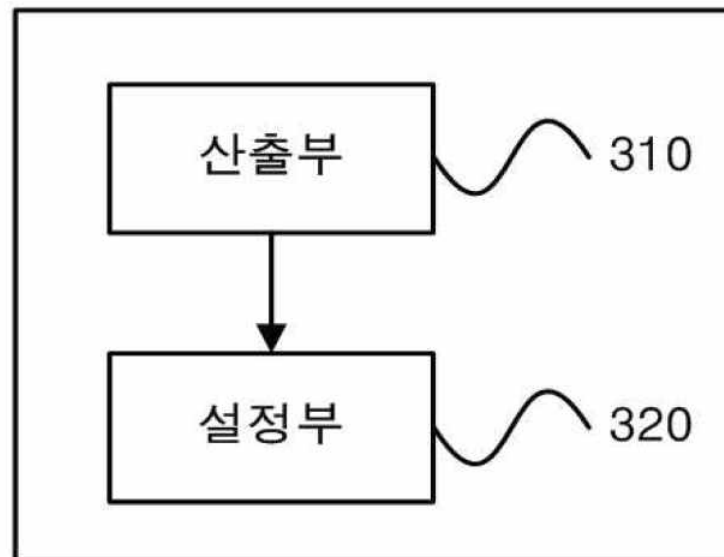


그림 60. 산출부 및 설정부

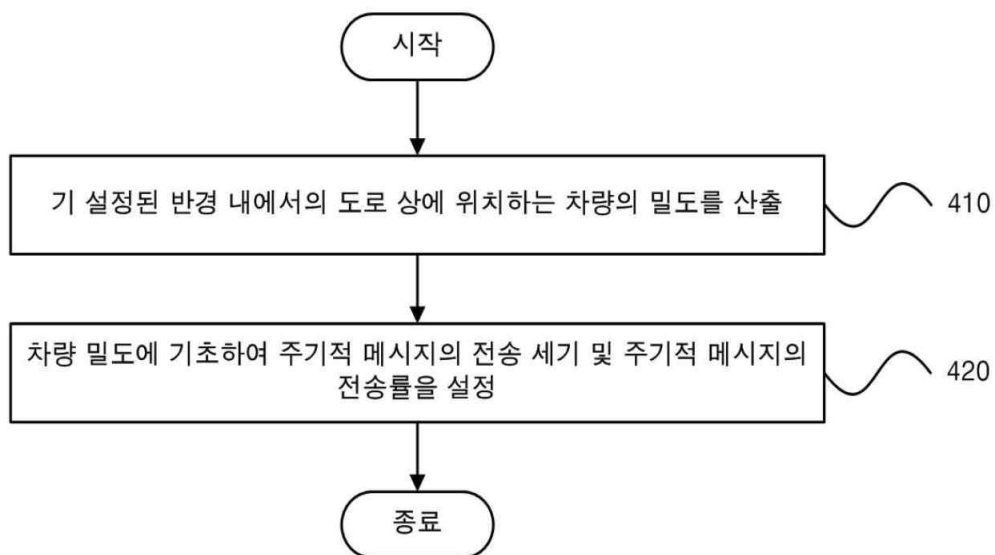


그림 61. 발명의 개략적인 흐름도

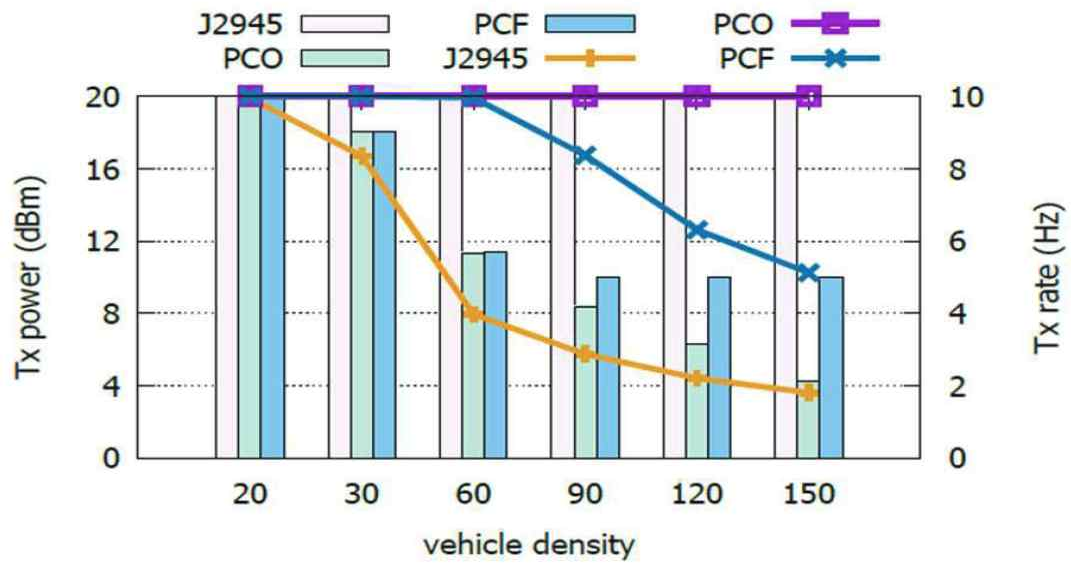


그림 62. 발명의 실시예들의 구성 비교

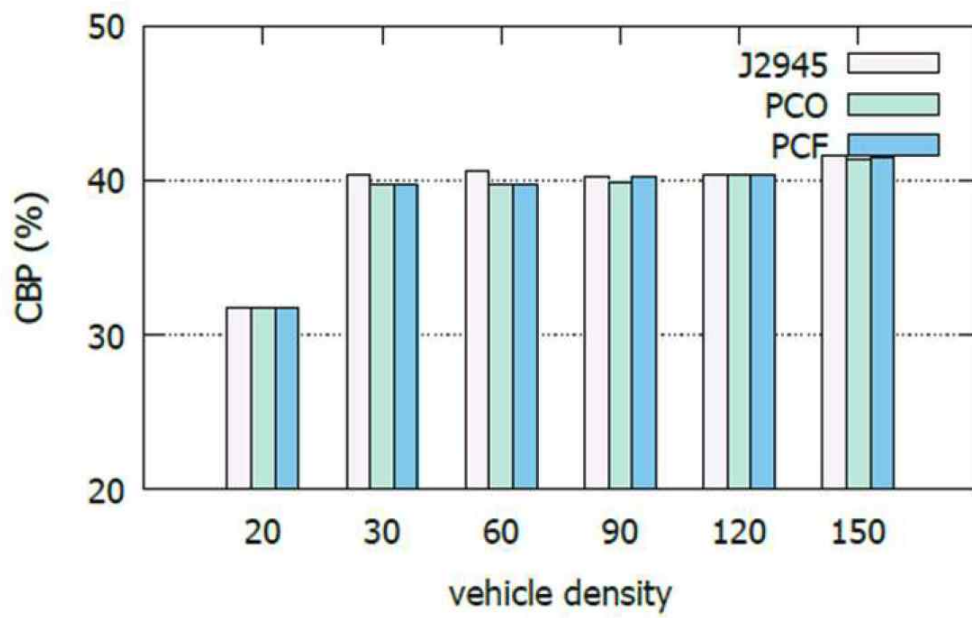


그림 63. 비슷한 자원 (CBP)을 소모하는 발명의 효과

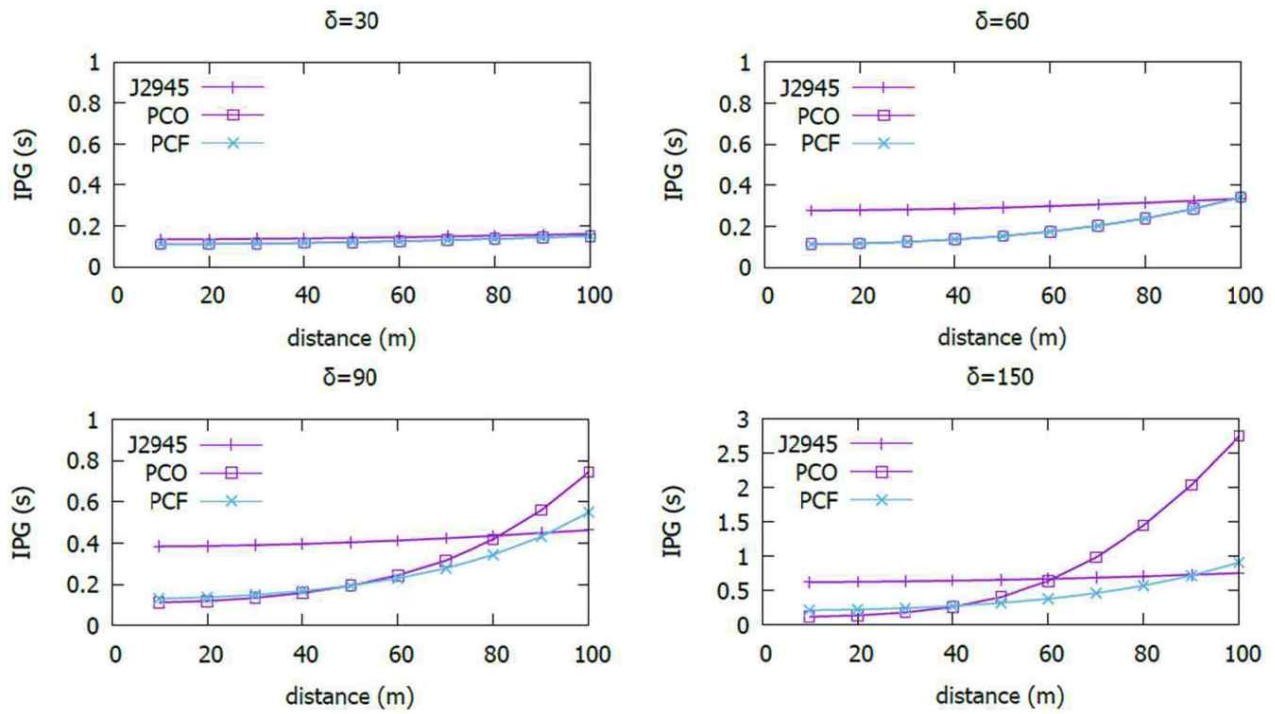


그림 64. 근거리에서 보다 나은 IPG를 보이는 발명의 효과

(라) 군집 주행을 위한 비콘의 효율적인 데이터 전송 속도에 관한 연구

○ 요약

- IEEE 802.11p 표준은 차량들로 하여금 주기적으로 비콘을 브로드캐스트 하여 안전과 관련된 정보를 주고받도록 규정하고 있음. 표준은 이러한 비콘을 전송하는 데 있어 여러 데이터 전송 속도를 정의하고 있지만, 일반적으로 6Mbps가 디폴트로 여겨짐
- 본 연구는 6Mbps 외의 다른 데이터 전송 속도를 고려해봐야 한다는 기존의 연구 결과에 착안, 이를 군집 주행에 적용하여 군집 주행 상황에서 나타날 수 있는 부작용을 완화할 수 있는 가능성을 제시함

○ 개요

- 최근 자동차 네트워크를 통한 차량 안전 및 주행 제어 서비스를 제공하는 연구가 활발하게 이루어지고 있는데, 차량간격 제어를 통하여 연속되는 차량을 가깝게 유지시킨 채로 그룹지어 주행하는 군집 주행은 그 대표적인 예라고 할 수 있음
- 군집 주행에서 가장 중요한 기술 중 하나는 차량 간 간격을 파악하여 속도를 조절하는 것이기 때문에, 군집 차량들은 서로의 최신 정보(위치 등)를 빠르고 지속적으로 갱신할 수 있어야 함
- IEEE 802.11p 표준은 차량들로 하여금 주기적으로 비콘을 브로드캐스트 하여 안전과 관련된 정보를 주고받도록 규정하고 있는데, 군집 주행에서의 비콘은 그 중요성이 더욱 강조됨. 게다가 군집 주행의 경우에는 보통의 주행에 비해 더 실시간에 가까운 정보 갱신을 필요로 하기 때문에, 현재 표준에 따라 비콘 전송을 한다면 동일한 안전을 보장받을 수가 없음
- A.Vinel은 군집 주행 상황에서의 비콘 전송 빈도는 10Hz(초당 10회)보다 높게, 최대 50Hz까지도 지원될 수 있어야 한다고 주장한 바 있음[26].
- 표준은 비콘을 전송하는 데 있어 여러 데이터 전송 속도(4.5, 6, 9, 12, 18, 27Mbps)를 정의하고 있으나, 일반적으로 6Mbps가 디폴트 속도로 여겨짐
- 최근 몇몇 연구들이 6Mbps보다 더 높은 데이터 전송 속도를 사용하는 것이 효율적일 수 있다고 주장하였음에도[27] 여전히 6Mbps가 디폴트로 사용되고 있는데, 그 이유는 이러한 연구가 안전과 직결되어 있기 때문임
- 자동차 네트워크의 특성상 안전을 보장하는 것이 필수이고, 효율은 안전을 보장하는 내에서 이루어져야 함. 따라서 자동차 네트워크에서는 더 높은 데이터 전송 속도를 사용하여 효율을 추구하는 것보다 상당한 거리까지 비콘을 확실하게 전송하는 것이 바람직함
- 그러나 군집 주행 상황에서는 비콘을 전송함에 있어 높은 전송 빈도와 6Mbps

의 데이터 전송 속도를 사용한다면, 심각한 부작용이 발생할 수 있음을 발견함

- 이에 군집 주행의 특성을 살려 군집 차량의 비콘 전송에 6Mbps 대신 더 높은 데이터 전송 속도를 이용한다면, 군집 차량과 주변 차량의 안전에 위해를 끼치지 않고도 그 부작용을 완화할 수 있음을 시뮬레이션을 통해 확인함

○ 군집 주행이 주변 차량에 끼치는 영향

- 서론에서 비콘의 중요성, 특히 군집 주행에서의 비콘 전송의 중요성을 언급하였으나, 앞에서 언급한대로 군집 주행의 비콘을 6Mbps로 더욱 빈번하게 전송하게 되면 군집 주행과 상관 없는 차량들의 안전에 심각한 위해를 끼칠 수 있음을 확인할 수 있었음
- 이는 군집 주행의 비콘 전송이 주변 차량들의 통신 채널 점유율을 상승시키기 때문임. 주변 차량들은 자신의 안전과 크게 관련이 없는 정보 때문에 무선통신 자원을 크게 소모하게 되고, 그 정도가 심해지게 되면 자신의 안전과 관련된 중요한 정보를 받지 못하게 되는 일이 발생할 수 있음
- 이 연구에서는 이러한 가설을 확인하기 위해 QualNet 시뮬레이터를 이용하여 군집 주행과 일반주행이 공존하는 상황을 그림 65과 같이 시뮬레이션 함. 군집 주행이 일반주행에 미치는 영향만을 구분하여 포착하기 위해 일반차량 (3개 차선)은 등간격으로 정지하고 있는 상황에서 표준에 따라 비콘을 전송하고 있고, 군집 차량들은 4차선에서 90Km/s의 속도로 이동하며, 높은 빈도(초당 50회)로 비콘을 전송하는 상황을 가정하였음

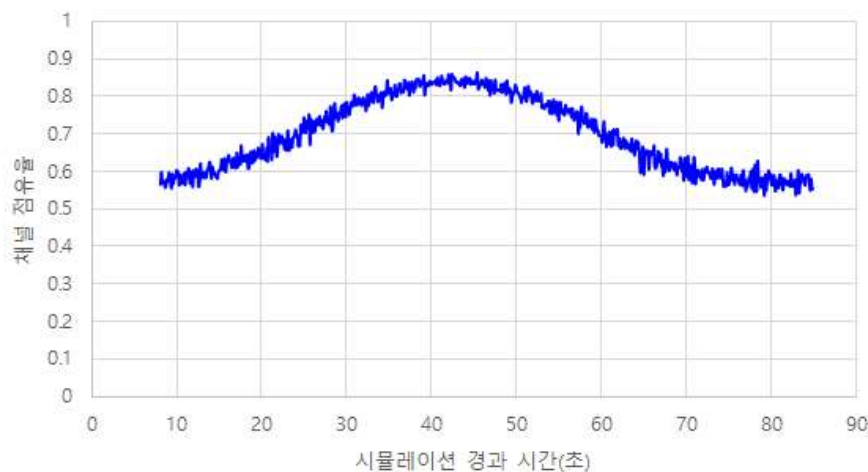


그림 65. 군집 차량 이동에 따른 주변 일반차량의 채널 점유율 변화
(군집 차량 30대, 초당 50회 전송, 6Mbps 사용)

- 그림 65는 30대의 군집 차량들이 디폴트 데이터 전송 속도인 6Mbps를 이용하여 50Hz로 비콘을 전송하며 이동할 때, 정지하고 있는 일반차량에서 관찰된 채널 점유율을 나타낸 시뮬레이션 결과로, 군집 차량들이 옆 차선으로 지나가기만 해도 주변 차량의 채널 점유율이 0.3에 가깝게 상승할 수 있다는 것을 확인할 수 있음
- 이렇게 채널 점유율이 크게 상승하면 주변 일반차량들 간 비콘 수신율이 떨어지게 되고, 결국 주변 차량의 안전에 심각한 위협을 끼치게 됨. 게다가 시뮬레이션 상에서는 일반차량이 정지하고 있기 때문에 군집 차량이 지나간 후에는 채널 점유율이 다시 하강하지만, 실제로 군집 주행과 일반 주행이 공존하는 경우에는 이러한 피해가 근접한 일반차량에게 더욱 오랜 시간 지속되어 안전에 심각한 위협을 끼칠 수 있음

○ 군집 주행 데이터 전송 속도 조절

- 군집 차량 이동에 따른 이러한 부작용을 완화하기 위해 [27]의 연구 내용을 고려할 필요가 있었음. 군집 주행의 경우 가까운 거리를 유지하며 운행하는 특성상 낮은 데이터 전송 속도를 사용하여 멀리까지 비콘을 전송할 필요가 없으므로, 더 높은 데이터 전송 속도를 사용하더라도 안전을 저해하지 않으면서도 효율을 추구할 수가 있을 것이라는 가설을 정립하였고, 가설을 검증하기 위해 군집 차량들이 6Mbps 대신 18Mbps로 비콘을 전송하도록 하고 주변 일반 차량의 채널 점유율에 미치는 영향을 분석함
- 군집 차량의 데이터 전송 속도만을 변경하여 동일한 시뮬레이션을 진행한 결과, 그림 65처럼 6Mbps로 전송했을 때보다 일반차량 채널 점유율 상승폭이 40%이상 감소하여 군집 주행의 부작용을 상당히 완화할 수 있음을 확인할 수 있었음
- 이 때, 앞서 언급한 가설처럼 부작용을 완화함으로 인해 군집 주행과 일반주행 모두의 안전에 문제가 없음을 확실히 할 필요가 있음. 따라서 비콘의 송수신 기록을 분석, 안전성과 관련된 대표적인 척도들을 각각 비교함
- 첫 번째로 군집 주행 자체의 안전에 문제가 없는지를 확인함. 그림 66는 군집 차량 중 가장 큰 채널 점유율을 겪는 가운데 노드를 기준으로 인접한 노드로부터 수신한 비콘의 비콘 간 시간차를 누적분포함수(CDF)로 나타낸 그래프로써, 군집 차량들이 비콘을 18Mbps로 전송할 때가 6Mbps로 전송할 때보다 정보 갱신이 빠르게 이루어지는 것을 알 수 있음. 비콘 수신율(Packet Reception Rate)도 79.01%에서 82.08%로 증가하였음

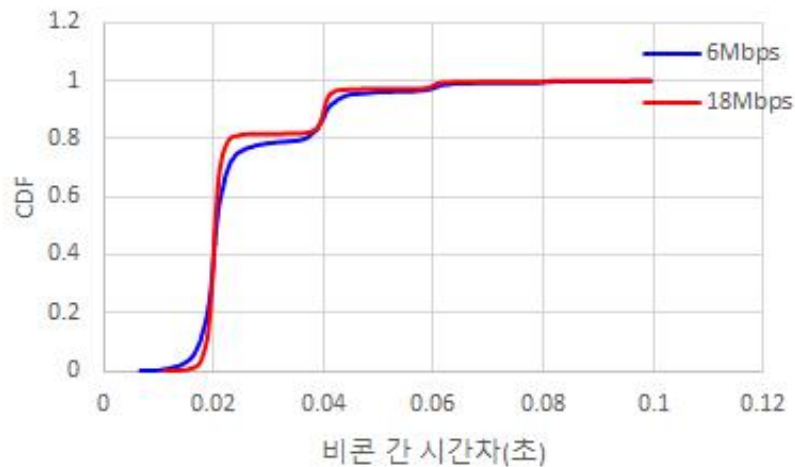


그림 66. 군집 주행 차량의 수신 비콘 간 시간차

- 또한 주변 차량의 안전에 미치는 영향을 확인하기 위해 시뮬레이션 결과를 분석하여 비콘 수신율과 수신된 비콘 간 시간차를 확인함. 그림 67는 동일한 상황에서 일반차량 1대를 기준으로 전송 거리에 따른 일반차량 간 비콘 수신율을 나타낸 그래프로서, 군집 차량들이 6Mbps를 사용할 때보다 18Mbps를 사용할 때, 거리와 상관없이 일반차량의 비콘 수신율이 더 높아져 안전이 더욱 보장됨을 확인할 수 있음

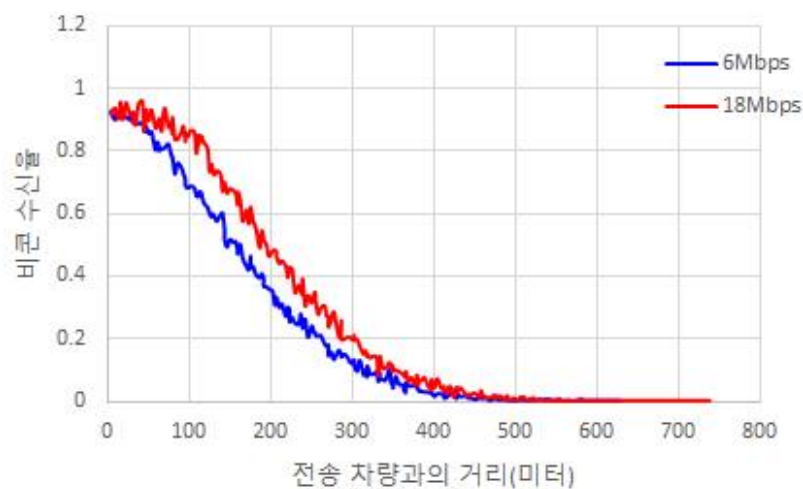


그림 67. 전송 차량과의 거리에 따른 비콘 수신율

- 비콘 간 시간차는 안전 확보를 위해 정보 갱신이 충분히 빠르게 이루어지는 지 확인할 수 있는 척도임. 따라서 시뮬레이션 결과를 분석하여 군집 차량들이 각각 6Mbps와 18Mbps로 비콘을 전송할 때, 일반차량 1대를 기준으로 전송 거리 100m 부근(95~105m)과 300m(205~305m)부근의 일반차량으로부터 수신한

비콘들을 대상으로 비콘 간 시간차를 계산하여 얼마나 빠르게 정보 갱신이 이루어지는지를 비교함



그림 68. 일반주행 차량의 수신 비콘 간 시간차

- 그림 68는 비콘 간 시간차를 누적분포함수(CDF)로 나타낸 것으로, 군집 차량들이 비콘을 18Mbps로 전송하면 6Mbps로 전송할 때보다 정보 갱신이 빠르게 이루어지며, 보다 먼 거리의 차량 정보도 더 빠르게 갱신됨을 확인할 수 있음
- 위와 같은 결과를 통해 군집 차량들이 비콘을 전송함에 있어 데이터 전송 속도를 높이면, 군집 주행이 다른 일반차량에 미치는 악영향을 완화하여 더 높은 비콘 수신율과 더 빠른 정보 갱신으로 안전성을 높일 수 있음을 알 수 있었음

○ 연구 결과

- 본 연구는 군집 주행의 특성상 표준에 명시된 빈도보다 높은 빈도의 비콘 전송이 필요함을 밝히고, 군집 주행의 비콘 전송이 일반차량의 채널 점유율을 상승시켜 안전에 악영향을 미칠 수 있음을 시뮬레이션을 통해 확인함
- 또한 군집 차량의 데이터 전송 속도를 높임으로써 안전에 위해를 끼치지 않으면서도 일반차량에 나타날 수 있는 부작용을 완화할 수 있음을 확인함

(마) 군집 차량 간 실시간 비디오 전송 성능 향상을 위한 연구

○ 요약

- 군집 주행은 오늘날 차량 간 통신을 위한 가장 유망한 응용 중 하나임
- 군집 주행을 사용하면 최대의 주행 효율을 얻기 위해 여러 차량을 최대한 가깝게 조종할 수 있음
- 여기서 문제는 후방 차량 운전자의 시야가 전방 차량에 의해 차단될 수 있다는 점임
- 후방 운전자의 안전과 심리적 안정성을 향상시키기 위해 차량 간의 비디오 스트리밍은 후방 차량 운전자에게 군집 리더의 전방 영상을 제공함
- 우리 연구에서는 군집 주행에서 IEEE 802.11p 브로드 캐스트를 사용하여 실시간 비디오 스트리밍 성능을 측정하였음
- 최악의 경우 충돌 및 hidden terminal 문제가 공존하는 경우 패킷 전달 비율이 48 %로 떨어지는 것을 확인함
- 프레임 손실을 줄이기 위해 브로드 캐스트 대신 재전송을 통해 프레임 복구가 가능한 의사-브로드캐스트를 사용함
- 또한, hidden terminal 문제를 해결하기 위해 송신 전력이 5dB만큼 증가한 RTS / CTS를 사용함
- 이를 통해 프레임 손실을 방지하고 패킷 전달 비율을 최대 96.8 %까지 높일 수 있음
- 우리 연구에서는 V2V 통신에서 유니캐스트와 브로드캐스트의 특성을 통합하는 새로운 방법을 이용하여 이 문제를 해결하였음
- 제안한 방식은 하드웨어 칩 레벨 수정 없이 장치 드라이버를 업데이트하여 기존 장치에 쉽게 적용 할 수 있는 장점이 있음

○ 개요

- V2V 통신을 통해 차량은 차량 및 주행 상태와 같은 중요한 정보를 다른 차량과 공유하여 주행 안전과 편의성을 향상시킬 수 있음
- 각 차량은 주변의 상황을 파악하고 위험한 상황에 신속하게 대처할 수 있도록 주변 차량과의 위치, 속도 및 방향 등의 운전 정보를 전송함
- 지난 수년 동안 V2V 통신을 이용한 주행 안전 개선에 관한 연구가 수행되었으며, 미국 교통부(DoT)는 모든 차량에 V2V 통신 기능을 탑재해야 한다는 법률을 제정하기 위해 2016년 말 관련 법규 (NPRM)를 공표함
- 군집 주행은 V2V 통신을 사용하는 응용 중 하나으로써, 군집 주행을 이용하면 여러 차량은 공기 저항을 줄이고 연료 효율을 높이면서 주행할 수 있음
- 특히 운송 및 수송의 경우, 연간 연료 소비를 10% 이상 줄일 수 있는 획기적

인 응용이 될 것임[28]

- 미국 연방 고속도로 관리국 (FHWA)은 버지니아주에 있는 트럭 3대를 사용하여 실제 환경에서 실현 가능성을 시험함
- 군집 내 차량들이 차량 간 거리를 최소한으로 줄이는 경우, 군집의 리더 차량을 따르는 운전자의 시야가 차단되는 것이 문제가 됨
- 차량이 ADAS (Advanced Driver Assistance System) 및 V2V 통신을 통해 다른 차량과의 충돌과 같은 사고를 예방할 수는 있지만, 운전자의 시각 방해는 운전자의 불안을 일으킬 수 있음
- 해당 문제를 해결하기 위해 전방 및 후방 카메라에서 촬영한 비디오를 사용하는 방법에 대한 다양한 연구가 진행되었음
- Bouchaala et al. [29]은 V2V 통신을 통한 비디오 스트리밍을 사용하여 차량, 장애물 및 보행자를 감지하는 응용 프로그램을 구현하여 군집 주행 또는 주차 상황에서 라이다 (LiDAR; Light Detection and Ranging)를 보완하였음. 이 응용 프로그램은 운전자의 안전 향상을 위해 운전자에게 확장된 전면 / 후면 시야를 제공함
- Vinel et al. [30]은 차량 군집이 반대편 차선에서 다른 군집을 만날 때 군집의 뒤쪽 차량에 정면의 영상 및 비콘 (beacon)을 전송하는 추월 지원 시스템을 제안함
- V2X (Vehicle-to-Everything) 통신에서 비디오 스트리밍을 이용하는 몇 가지 감시 응용 프로그램이 존재함 [31],[32]
- 우리 연구에서는 군집 주행에서 실시간 비디오 스트리밍을 사용할 때, 문제가 발생할 수 있는 상황을 관찰하고 이를 해결하고자 함. 비디오 스트리밍을 사용하는 상황은 아래와 같이 묘사할 수 있음
- 차량 군집의 리더 차량이 전면 시야 비디오를 군집 안의 차량들에게 전송
- 제한된 대역폭 (bandwidth)으로 인하여, 리더 차량은 IEEE 802.11 [33]에서 MAC (Medium Access Control) 계층 전송 방법 중 브로드캐스트 (broadcast) / 멀티캐스트 (multicast)로 비디오 스트림을 전송해야 함
- 군집에 소속된 차량은 운전자 앞의 화면을 통해 스트리밍 된 비디오를 수신하고 재생함
- 이때 한 홉 (hop) 방송의 성능은 차량 간의 거리, 주변 환경, 차량, 채널 이용률 등에 영향을 받을 수 있음
- 우리 연구에서는 위의 상황에서 통신 성능을 평가하고, 발생할 수 있는 문제점을 개선할 방법을 제안하고자 함
- 이전 연구에서 Park et al. [34]은 다수의 방에 IPTV 전송 상황에서 효율성과 신뢰성을 향상시키기 위해 IEEE 802.11 유니캐스트 (unicast)와 브로드캐스트 / 멀티캐스트 기반의 의사-브로드캐스트 (pseudo-broadcast)라는 새로운

방법을 제안하였음

- 의사-브로드캐스트를 사용하는 액세스 포인트 (AP)는 프레임을 최악의 링크 품질을 갖는 IEEE 802.11 스테이션 (STA)에 전송하고 다른 STA는 무차별 (promiscuous) mode 1에서 유니캐스트 프레임을 수신함
- 목적지 STA가 프레임을 잃는 경우, AP는 손실된 프레임을 재전송하여 복구하고, 각 STA는 목적지 STA가 재전송 된 프레임을 성공적으로 수신할 때까지 해당 프레임을 복구할 기회를 가짐
- 군집 내 V2V 통신에서 기본적인 전송 방법을 의사-브로드캐스트로 대체함
- 군집 리더 차량은 유니캐스트 목적지 STA로 최악의 프레임 오류율 (FER; Frame Error Rate)을 가진 차량을 지정하고 정면 영상을 전송
- 각 차량은 리더로부터 전송된 유니캐스트 프레임을 해당 프레임의 목적지인 것처럼 무차별 모드로 비디오를 수신
- 이를 통해 결론적으로 최악의 상황이라 할 수 있는 패킷 충돌과 hidden terminal 문제가 공존하는 상황에서, 영상 전송의 패킷 전송률 (PDR; Packet Delivery Ratio)을 최대 36%까지 향상시킬 수 있음

○ 군집의 비디오 브로드캐스트를 위한 V2V 통신

- 군집 주행의 효율을 높이려면 각 차량은 앞 차량과의 거리를 최소화해야 함
- 앞 차량과의 거리가 짧을 때, 후방 차량 운전자는 정면을 제한적으로 볼 수밖에 없으므로 운전자의 집중력을 떨어뜨리고 군집이 안전하게 운영되더라도 예기치 못한 상황에 대처하기 어려움
- 이 문제를 해결하는 방법은 후방 차량 운전자가 주변 환경 및 상황을 파악할 수 있도록 리더 차량이 후방 차량에 자신의 정면 영상을 공유하는 것임
- 군집에서 자신의 정면 영상을 실시간으로 전송하기 위해 리더 차량은 V2V 통신을 사용할 수 있음
- 아래의 그림은 V2V 통신을 이용한 비디오 스트리밍 응용 프로그램의 절차를 나타낸 것임 (그림 69)

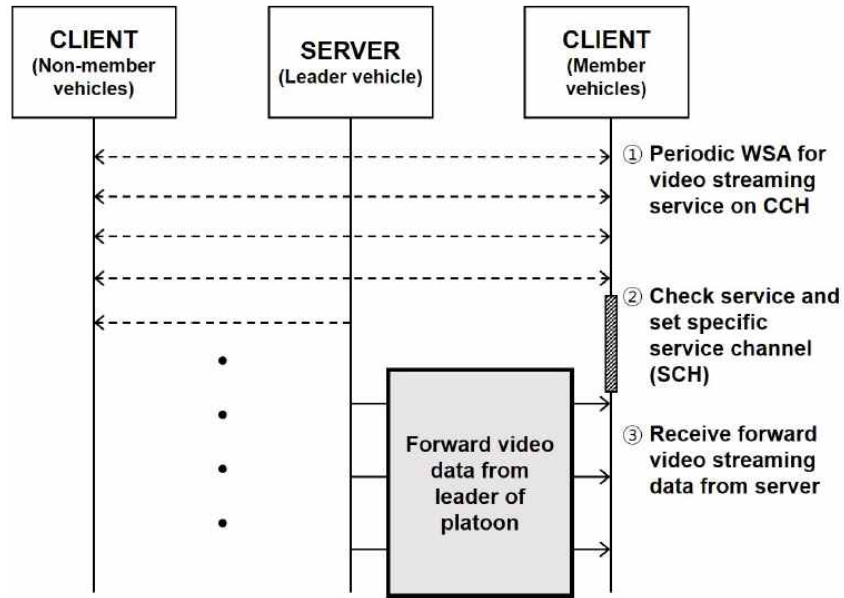


그림 69. 비디오 스트리밍 응용 프로그램의 메시지 교환 절차

- 응용 프로그램에서 리더 차량이 비디오 스트리밍 서버 역할을 할 때, 군집 구성원 차량은 스트리밍 된 비디오를 수신하여 표시함
- V2V 통신에 관한 IEEE 1609.3 [35]의 Wave Service Advertisement (WSA)를 사용함으로써, 이 응용 프로그램은 리더 차량과 구성원 차량이 각각 공급자 (Provider)와 사용자 (User)의 역할을 함
- 사용자는 미리 정의된 Provider Service Identifier (PSID)를 포함하는 서비스 요청을 전송함으로써 스트리밍 응용 프로그램을 UserServiceRequestTable에 등록함
- 리더 차량의 스트리밍 응용 프로그램은 주기적으로 제어 채널 (CCH)에 PSID, 리더의 IPv6 주소 및 응용 프로그램의 포트 번호가 포함 된 WSA를 전송함
- 구성원 차량은 CCH 간격 (CCHI; CCH Interval) 동안 WSA를 수신하고 서비스 채널 간격 (SCH; SSH Interval) 동안 WSA에 발표된 서비스 채널 (SCH)에 접근함
- 위의 과정으로 군집 구성원 차량의 응용 프로그램은 리더 차량의 전면 시야 영상을 스트리밍함
- 군집 구성원이 아닌 차량의 경우, WSA의 PSID가 자신의 UserServiceRequestTable에 등록되지 않았기 때문에 CCH에서 리더의 WSA를 수신하더라도 브로드캐스팅된 WSA의 SCH로 이동할 수 없음
- IEEE 802.11p를 사용하는 V2V 통신의 MAC 계층은 비디오 스트리밍을 위해 유니캐스트, 브로드캐스트 및 멀티캐스트를 사용할 수 있음
- 그러나 V2V 채널의 대역폭이 제한되어 있기 때문에, 유니캐스트는 전면 영상 비디오를 모든 구성원 차량에 전송하는 데 비효율적임. 따라서 응용 프로그램

은 브로드캐스트 또는 멀티캐스트를 사용해야 함

- 하지만 브로드캐스트 또는 멀티캐스트를 사용하면 고속 이동성 및 hidden terminal 문제로 인한 프레임 손실을 줄일 수 있는 frame retransmission (프레임 재전송)이나 RTS / CTS를 활용하지 않기 때문에 비디오 품질 저하를 방지할 수 없음
- 따라서 이 문제를 해결하기 위해 유니캐스트와 브로드캐스트의 장점을 통합한 새로운 솔루션이 필요함
- 군집 주행을 위해 V2V를 사용할 때, 여러 군집이 한 차선에 나란히 서서 차선을 따라 이동할 때 비디오 전송에 문제가 발생할 수 있음 (그림 70)

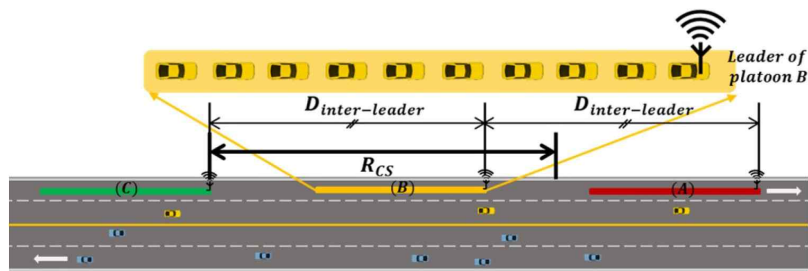


그림 70. 군집 주행을 위한 차선에서 비디오 전송 상황

- 군집 A와 C에서 리더가 서로의 전송을 인식하지 못하면 hidden terminal 문제가 발생할 수 있음
- 캐리어 감지 범위 R_{CS} 에 대해, $R_{CS} < 2 \times D_{inter-leader}$ 를 만족할 때 해당 상황이 발생함
- 이 경우 두 군집 A와 C의 리더 차량 간의 중간 차량은 두 리더가 동시에 전송한 프레임 간 충돌로 인해 프레임 수신율이 떨어지고 비디오 화질이 저하될 수 있음
- 위와 같은 혼잡 상황과 hidden terminal 문제로 인한 프레임 손실을 극복하기 위해, 리더 차량이 정면에서 실시간 비디오 스트림을 전송할 때 (2) RTS / CTS를 사용한 (1) 의사-브로드캐스트를 제안함

○ 의사-브로드캐스트

- 의사-브로드캐스트[34]는 무차별 모드에서 브로드캐스트 / 멀티캐스트와 유니캐스트의 프레임 재전송을 통합한 전송 방법임
- 의사-브로드캐스트를 사용하는 AP는 프레임 재전송을 이용하기 위해 유니캐스트 전송의 대상 노드를 지정해야 함
- 의사-브로드캐스트는 전송의 대상 노드를 결정하기 위해 IEEE 802.11k[36]에서 Measurement Request 및 Measurement Report 프레임을 기반으로 한 교환

메커니즘을 이용함

- AP가 STA에 Frame Error Rate (FER) request 프레임을 보내면 각 STA는 자신의 FER을 AP에 보고함
- AP는 STA로부터의 보고에 기반하여 최악의 FER을 갖는 목적지 STA A를 선택함. AP는 데이터 프레임을 A로 전송하고, AP가 A로부터 ACK를 수신하지 않을 때 프레임을 재전송함
- A를 제외한 다른 STA가 데이터 프레임을 수신하지 못하면 STA는 AP가 데이터 프레임을 A로 재전송 할 때 복구 할 수 있는 기회를 갖게됨
- 반대로, AP가 A로부터 데이터 프레임에 대한 ACK을 수신하는 동안 일부 STA가 프레임을 수신하지 못하면, STA는 브로드캐스트 / 멀티캐스트와 유사하게 복구 할 기회가 없음

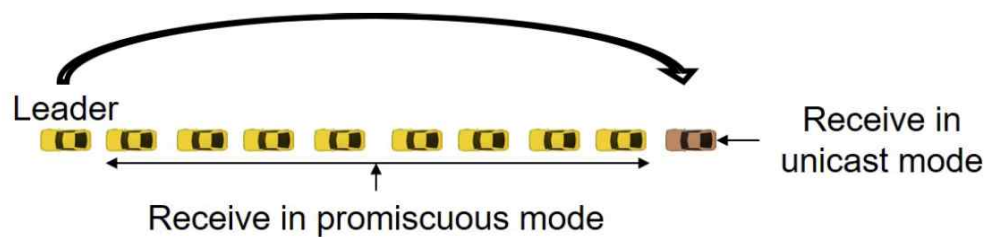


그림 71. 의사-브로드캐스트의 예시

- 그림 71은 군집 주행에서 사용되는 의사-브로드캐스트의 예시를 나타냄
- 군집의 리더 차량과 다른 구성원들은 유니캐스트에서 프레임을 수신하는 대상 차량을 선택하기 위해 FER 대신 PDR에 대해 Request/Report 프레임 교환을 함
- 리더 차량은 비디오 프레임을 전송할 때 대상 차량을 비디오 프레임의 대상으로 지정하고 다른 차량은 프레임의 대상에 관계없이 무차별 모드로 프레임을 수신함
- 따라서 차량이 리더로부터 첫 번째 전송된 프레임을 수신 할 수 없더라도 재 전송 된 프레임을 성공적으로 수신하면 아무 문제없이 비디오를 재생할 수 있음
- 또한 기존의 디바이스들은 하드웨어 칩 레벨의 수정없이 디바이스 드라이버만을 업데이트함으로써 의사-브로드캐스트를 쉽게 적용 할 수 있음

○ RTS / CTS 교환

- RTS / CTS는 데이터를 전송하기 전에 유니캐스트의 전송지 STA와 목적지 STA 간에 교환 된 짧은 제어 프레임으로 명시적으로 채널을 점유함

- 프레임 지속 시간을 포함하는 RTS 수신에 성공하면, 목적지 STA는 RTS ACK를 확인하기 위해 전송지에 CTS를 전송함
- CTS를 수신 한 후, 전송지는 목적지로 데이터 프레임을 전송하기 시작함
- 동시에, 주변 STA는 RTS로부터의 프레임 지속 기간 및 CTS로부터의 채널 점유 상태를 인식 할 수 있고, 전송 종료를 기다릴 수 있음
- CTS는 송신자의 송신 범위 밖에 있는 STA들에 전달되기 때문에 송신자의 송신 시간을 기다려 hidden terminal 문제를 피할 수 있음
- 의사-브로드캐스트는 기존의 브로드캐스트 / 멀티캐스트 방식 대신 유니캐스트 전송 방식을 사용하기 때문에 유니캐스트에서만 사용할 수 있는 성능 향상 방식을 사용할 수 있음
- 이를 통해, RTS / CTS를 이용한 의사-브로드캐스트는 hidden terminal 문제를 방지하여 채널 접근이 안정적으로 이루어질 수 있도록 함

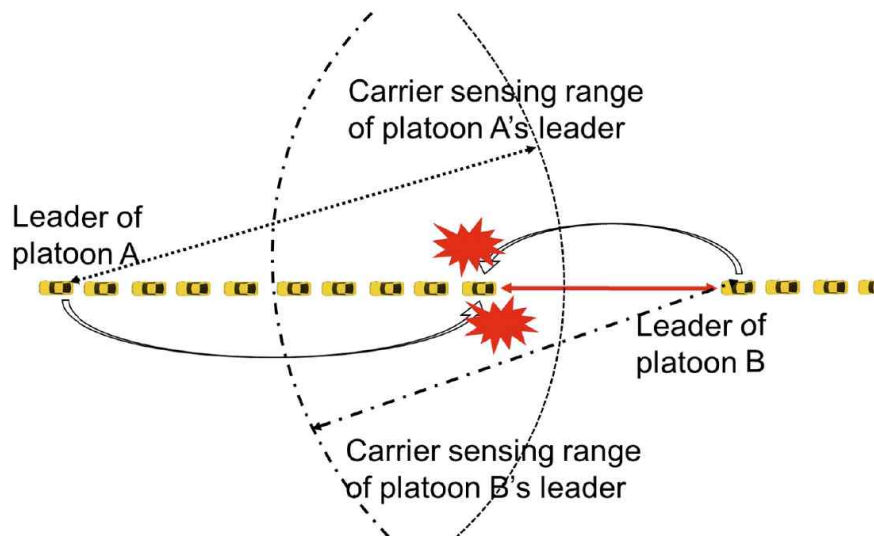


그림 72. Hidden terminal 문제의 예시

- 그림 72은 두 군집이 각 군집의 리더를 따라 이동할 때 군집 A의 리더와 군집 B의 리더 사이의 거리가 캐리어 감지 범위보다 큰 경우의 예시임
- 2 개의 군집이 우연히 동일한 SCH에서 비디오 스트리밍을 하면 두 리더 차량이 계속 비디오 전송을 시도 할 수 있으며, 군집 A의 구성원 차량은 군집 A와 B의 리더 차량 모두에서 전송 된 비디오 프레임의 충돌로 인해 프레임 수신에 실패 할 수 있음
- 이 경우 의사-브로드캐스트와 RTS / CTS를 함께 사용하면 대상 차량은 CTS를 보내어 군집 B의 리더 차량의 송신을 지연시켜 hidden terminal 문제를 방지 할 수 있음
- 그러나 RTS / CTS가 데이터 프레임과 동일한 송신 전력으로 송신된다면 다음

과 같은 문제점이 발생할 수 있음

- ☞ 의사-브로드캐스트의 대상 차량이 hidden terminal 선점 수단에 의해 전송된 비디오를 수신하면, 리더 차량은 이 상황을 알지 못하고 계속해서 RTS를 전송함
 - ☞ 결과적으로 RTS 재전송 타임 아웃이 발생하여 데이터 프레임을 전송할 수 없게 되고 결국 폐기됨
- 우리 연구에서는 RTS / CTS를 더 먼 전송 범위에 전송함으로써 hidden terminal 문제를 방지하기 위해, RTS / CTS의 전송 전력을 증가시켰음

○ 시뮬레이션

- 여러 군집이 단일 차선에서 비디오 스트리밍 서비스를 수행할 때 성능을 평가하고 문제를 해결하기 위해 시뮬레이션을 수행하였음

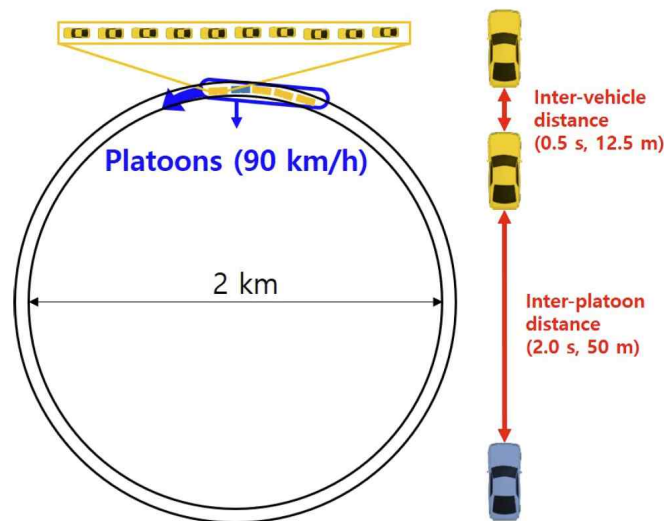


그림 73. 시뮬레이션 차량 설정

- 5개의 차량 군집이 반경 1km의 원 차선에서 90km/h (25m/s)로 움직일 때를 가정함 (그림 73)
- 각 군집은 10 대의 차량으로 구성되며, 가장 앞선 차량은 리더 역할을 함
- 군집 내에서 인접한 차량 간의 차간 거리는 0.5초 (12.5m) [26]임
- 가장 앞쪽의 리더를 제외한 모든 리더는 안전거리가 2초 (50 m)로 설정하고 앞선 군집을 따르고 [37], 카메라가 촬영한 전면 영상을 군집의 구성원들에게 전달한다고 가정함
- 시뮬레이션은 QualNet 5.1 네트워크 시뮬레이터 [38]와 IEEE 802.11p를 사용하여 진행하였고, 6Mbps의 데이터 전송률, 20dBm의 전송 전력 및 -85dBm의 수신기 감도로 비디오 데이터를 전송하였음
- 무선 채널은 free space channel model (pathloss exponent = 2.0) 및

- Racian fading model (K-factor = 3)을 사용하여 모델링됨
- 비디오 응용 프로그램은 22.278ms마다 1460 바이트의 데이터를 UDP로 전송하며 목표 비디오 속도는 0.5Mbps임
 - 우리 연구에서 제안된 의사-브로드캐스트와 RTS / CTS가 위의 환경에서 사용될 때 성능 향상을 조사하였음
 - 5개의 차량 군집 중 중간에 있는 군집을 살펴봄으로써, 군집이 해당 차선에서 가장 열악한 환경에 있을 때 비디오 스트리밍이 어떻게 수행되는지 관찰할 수 있음
 - 전송 범위가 확장된 RTS / CTS의 경우, RTS / CTS의 전송 전력을 5dB 증가시켜 약 두 배가 됨
 - 의사-브로드캐스트를 사용할 때 MAC 계층에서 프레임을 분류하고 PDR을 보고하는 방법은 Park et al. [34]의 연구를 참조하였음
 - 전자의 경우 프레임을 추출하기 위해 IEEE 802.11 MAC 헤더에서 프레임 제어 유형의 예약된 2 비트 (112)를 사용하고, 후자의 경우에는 IEEE 802.11k의 Measurement Request 와 Measurement Report 프레임을 사용하여 군집 구성원들의 PDR을 리더 차량에 보고함
 - 실험은 40 초 동안 진행했고, 시뮬레이션에서는 아래의 항목들을 측정함
 - ☞ Packet Delivery Rate (PDR) : 송신자가 보내려고 하는 패킷 수와 비교하여 수신기에 성공적으로 전송된 패킷의 비율
 - ☞ IPG (Inter Packet Gap) : 연속 수신 프레임 간의 시간 간격. 비디오 전송의 경우에는 재생할 프레임 속도가 있기 때문에, 이 시간 내에 일정 수의 프레임이 도착해야지만 원활한 비디오 재생이 가능함
 - 프레임 손실의 원인에 따라 비디오 스트리밍을 위한 V2V 통신의 성능 변화는 완전히 다름
 - 따라서 원인을 정리하고 사례에 적합한 시뮬레이션을 진행해야함
 - ☞ 첫째, 채널 손실은 무선 채널 상태로 인한 간섭 또는 감쇠의 영향으로 신호가 감쇠될 때 발생함
 - ☞ 둘째, 패킷 충돌은 동일한 반송파 감지 범위에 있는 두 노드가 우발적으로 동일한 경쟁 슬롯, 10MHz 채널 [39]에서 경쟁 슬롯 시간 (13 us)에서 프레임을 보내려고 할 때 발생함
 - ☞ 셋째, hidden terminal 문제는 채널이 이미 한 발신자에 의해 점유되어 있고 송신자를 인식할 수 없는 다른 송신자가 프레임을 전송하려고 시도할 때, 두 개 이상의 신호가 중간의 차량에서 겹쳐져 발생함
 - 각 프레임 손실 사례를 생성하기 위해 응용 계층에서 초기 전송 타이밍을 조정하였음
 - ☞ 채널 손실 사례를 생성하기 위해 각 군집 리더의 전송 타이밍은 경쟁이

발생하지 않는 상황을 생성하기 위해 최소 경쟁 시간 CW_{min} 보다 길게 설정하였음

- ☞ 충돌 사례를 생성하기 위해 캐리어 감지 범위 내의 인접한 군집의 전송 타이밍을 CW_{min} 보다 작게 설정하여, 각 전송 시 경쟁이 발생할 수 있도록 하였음
- ☞ 상호 반송과 감지 범위를 벗어난 리더 간의 전송 타이밍 차이를 프레임 전송 시간보다 줄임으로써 hidden terminal 문제를 지속적으로 발생 시킴
- 최악의 조건에서 성능 평가를 위해 충돌과 hidden terminal 문제가 함께 발생하는 시나리오를 만듦

○ 패킷 전송률

- 그림 74는 5개 차량 군집 중 중간 군집의 리더 차량이 비디오 스트리밍을 수행 할 때, 리더 차량에서 해당 군집 내 수신 차량까지의 거리 별 PDR을 나타내고 있음
- 그림에서 PBcast는 의사-브로드캐스트고 D는 m 단위의 거리, HTP는 hidden terminal 문제이며 C+HTP는 충돌 및 hidden terminal 문제의 조합임

	D (m)	17.5	35.0	52.5	70.0	87.5	105.0	122.5	140.0	157.5
Broadcast	Channel loss	100.0	99.8	99.4	99.3	98.9	97.5	96.2	94.4	92.2
	Collision	86.5	85.7	85.7	85.1	84.2	82.9	81.1	79.8	78.7
	HTP	99.8	99.4	98.3	96.8	92.8	87.6	77.3	68.2	55.0
	C+HTP	84.8	79.9	77.8	73.9	69.5	64.5	59.6	54.0	48.0
PBcast	Channel loss	98.4	99.0	98.8	98.6	97.9	96.9	95.9	94.0	100.0
	Collision	99.3	99.3	98.7	98.8	97.3	95.9	94.8	92.3	100.0
	HTP	99.7	99.6	99.2	98.5	96.7	93.4	88.6	84.0	99.0
	C+HTP	96.7	96.2	95.8	94.0	92.2	89.1	87.2	84.0	100.0
PBcast w/ RTS/CTS	Channel loss	99.3	98.8	98.8	98.3	97.8	96.5	95.4	93.5	99.3
	Collision	97.8	97.5	97.3	96.8	96.4	95.7	94.5	93.0	97.9
	HTP	99.3	99.2	98.7	98.4	98.1	96.5	95.7	94.0	98.4
	C+HTP	96.8	96.3	96.2	95.8	95.0	94.3	92.9	90.9	96.8

그림 74. 각 군집 내 구성원의 PDR

- 비디오 스트림이 IEEE 802.11p 브로드캐스트를 사용하여 전송 될 때, 앞서 언급 한 손실의 유형에 따라 PDR 감소가 다름
- ☞ 채널 손실의 경우, 170m 멀리 있는 군집의 마지막 차량의 PDR은 약 92.2 %임
- ☞ 충돌 사례의 경우, 가장 가까운 차량의 PDR은 86.5 %이고 가장 멀리 있는 차량의 PDR은 78.7 %임. 두 대의 차량이 모든 프레임 전송에 대해 서로

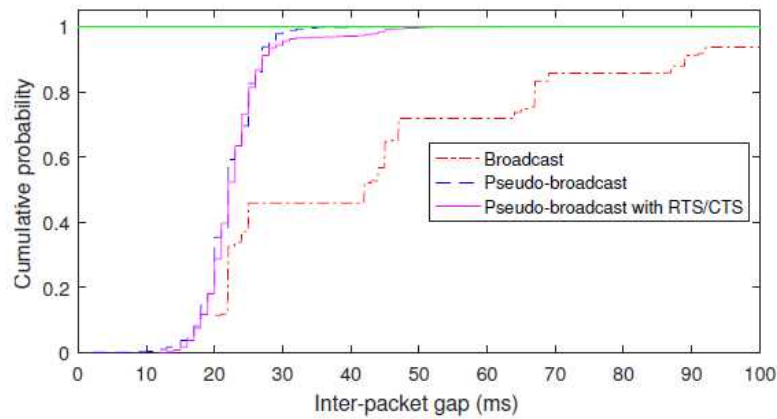
경쟁함

- ☞ 충돌로 인해 프레임이 손실되는 경우 군집의 모든 차량이 영향을 받으므로 모든 군집 구성원의 전반적인 PDR 감소를 관찰 할 수 있음
- ☞ HTP의 경우 맨 끝 군집의 리더 차량이 hidden terminal 역할을 함. PDR은 채널 손실의 경우보다 빠르게 감소하고, 가장 먼 차량의 PDR은 약 55 %임
- ☞ 이것은 hidden terminal이 전송 한 신호가 리더 차량의 신호와 중첩되어 손실을 유발하기 때문임
- ☞ 특히, 리더 차량과의 거리가 멀어 질수록 hidden terminal의 신호가 강하게 수신되어 PDR이 급격히 감소함
- ☞ C+HTP 경우는 최악의 경우로써 마지막 차량의 PDR은 48 %임
- 우리 연구에서는 브로드캐스트 / 멀티캐스트 전송에서 유니캐스트 재전송과 동일한 효과를 얻기 위해 의사-브로드캐스트를 사용하여 비디오 전송의 신뢰성을 향상시키고자 하였음
- 위의 그림 74에서 PBcast는 채널 손실, 충돌 및 hidden terminal 문제를 처리하기 위해 비디오 전송에 의사-브로드캐스트를 적용한 결과임
 - ☞ 브로드캐스트와 달리 재전송을 이용하기 때문에, 모든 경우에 대해 의사-브로드캐스트 대상으로 지정된 최종 차량의 PDR이 99 %까지 향상되었고 C+HTP 상황 역시 52%로 향상되었음
 - ☞ 의사-브로드캐스트의 대상이 아닌 다른 차량의 경우, 대상 차량이 재전송에 의해 성공적으로 수신하거나 성공적으로 복구 할 때 프레임 손실에 비해 더 낮은 값을 보임. 그럼에도 불구하고 대부분의 경우 프레임 손실은 재전송에 의해 복구되고 PDR은 최대 30% 향상을 보임
 - ☞ 채널 손실의 경우 대상 차량을 제외한 모든 차량에서 최대 6%의 프레임 손실이 발생함. 이는 재전송을 포함한 전송 시간 증가로 인한 군집 간의 경쟁이 발생하기 때문임
- 위의 PBcast에 대한 결과를 통해 hidden terminal 문제로 인한 프레임 손실이 여전히 발생한다는 것을 확인함. 때문에 RTS / CTS를 사용하여 hidden terminal 문제의 발생 상황을 줄이고자 함
- 리더 차량이 프레임 전송 전에 RTS를 전송하고 대상 차량이 CTS를 전송하면 시도된 전송 부근의 다른 리더 차량이 숨은 단말기 문제를 방지하기 위해 수신 상태로 변경할 수 있음
 - ☞ HTP 경우 최대 10%, RTS / CTS를 사용하는 C+HTP의 경우 최대 6.9%까지 PDR 향상을 얻을 수 있음
 - ☞ 이는 전송 전력이 증가 된 RTS / CTS를 사용하면 hidden terminal 문제를 방지하고 전송 성공률을 높일 수 있기 때문임
- 이상의 결과로부터 의사-브로드캐스트의 프레임 재전송을 통한 손실 복구와

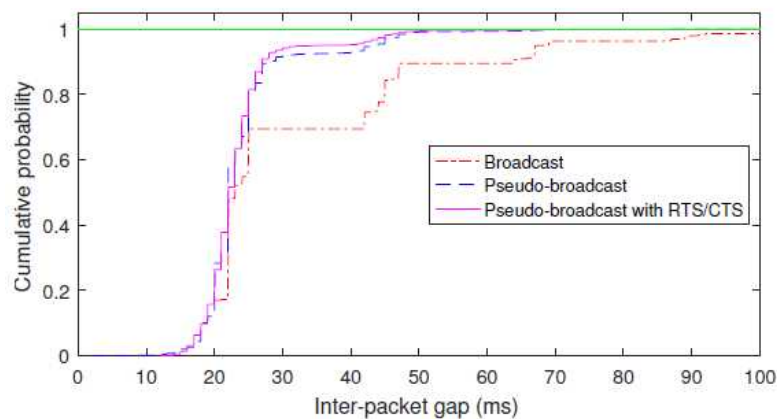
전송 전력이 증가 된 RTS / CTS의 채널 선점을 이용하여 hidden terminal 문제를 방지함으로써 PDR을 향상시킬 수 있음을 보였음

○ 패킷 간 간격

- 의사-브로드캐스트와 RTS / CTS를 사용하여 IPG를 측정하여 프레임 수신 안정적이지 여부를 확인하고자 함
- 그림 75은 가장 심각한 프레임 손실 환경인 C+HTP 경우에 대한 IPG를 나타낸 그림임



(a) IPG of last vehicle



(b) IPG of all platoon members

그림 75. 충돌과 hidden terminal 문제가 발생할 때 군집 구성원들의 IPG

- 각 그래프는 모든 차량의 리더 차량이 전송 한 비디오를 수신 할 때 관찰되는 각 IPG의 누적 분포 함수 (CDF)임
- 비디오 스트리밍 응용에서 비디오 전송을 위한 이상적인 프레임 간 간격 IPG는 22.278ms임
- Jitter (지터)는 채널 경합 및 의사-브로드캐스트의 재전송으로 인해 발생할 수 있음
- IPG가 22.278ms의 두 배를 넘는 경우 프레임 손실이 발생할 수 있음

- 그림 75 (a) 군집 내 마지막 차량의 경우 브로드캐스트를 사용할 때 54.0 %의 프레임이 손실 된 후에 수신됨
 - ☞ 충돌로 인한 프레임 손실과 hidden problem 문제로 인하여 프레임의 전송 간격은 일정하지 않으며 100ms를 초과하는 경우가 전체의 8% 이상 관찰됨
 - ☞ 의사-브로드캐스트를 사용하는 경우 재전송에 의한 지터가 추가되지만 IPG는 전체 프레임의 100 %를 수신하므로 거의 일정함
 - ☞ 또한, RTS / CTS를 사용하는 경우, 재전송시에 RTS가 데이터 대신에 전송되므로, 전송 시간이 단축되고 지터가 감소됨
 - ☞ 그럼에도 불구하고, RTS 재전송 타임 아웃이 발생하고 프레임 수신 3%가 이상적인 IPG의 2 배 이상을 차지하는 것을 알 수 있음
- 그림 75 (b)는 군집의 모든 차량에 대한 IPG 결과를 나타냄
 - ☞ 브로드캐스트를 사용할 때 수신 지연된 프레임은 전체 프레임의 30.6%임
 - ☞ 이는 중간 군집 구성원 차량이 맨 끝의 차량보다 리더 차량에 더 근접하여 프레임 손실이 감소되기 때문임
 - ☞ 또한 의사-브로드캐스트를 사용하는 경우 7.21%로, RTS / CTS를 사용할 때는 4.78%로 줄어듦
- 결과적으로, 충돌 및 hidden terminal 문제가 존재하는 군집 주행 상황에서 의사-브로드캐스트 및 RTS / CTS의 사용을 통해 프레임 전송 성공률을 높이고 프레임 수신 지연을 줄임으로써 비디오 전송을 원활하게 할 수 있음

○ 연구 결과

- 우리 연구에서는 군집 주행 시 발생할 수 있는 운전자의 시야 장애를 해결하기 위해 군집의 리더 차량이 V2X 통신을 사용하여 전면 시야 비디오 스트리밍을 할 때, 이의 성능을 측정하였음
- 또한 의사-브로드캐스트 및 RTS / CTS를 사용하여 전송 성능의 향상을 시뮬레이션을 통해 보임
- 결과적으로 모든 군집 구성원의 PDR을 향상시키고 IPG를 안정화하여 원활하게 비디오를 수신 할 수 있는 환경을 제공하였음
- 후속 연구로 시뮬레이션 관련 실험을 넘어 실제 환경에서 실제 비디오를 사용하여 성능을 확인할 것임
- 연구 내 실험에서는 채널이 포화 상태가 아닌 것으로 가정하여 시뮬레이션을 진행하였지만, 앞으로는 2 개 이상의 군집 주행 차선을 사용하거나 더 높은 품질의 비디오를 사용할 때 발생할 수 있는 채널 포화에 대한 의사-브로드캐스트 및 RTS / CTS의 영향을 연구할 것임

(바) C-V2X에서 차량 간 통신의 충돌 감소를 위한 SPS 알고리즘 개선 연구

○ 요약

- C-V2X Sidelink Mode 4 통신에서 센싱 기반 Semi-Persistent Scheduling (SPS)은 무선 채널 혼잡의 바람직하지 못한 영향에 대처하기 위한 알고리즘임
- 현재의 표준 메커니즘은 패킷 충돌을 많이 발생 시키므로 향후 자율 운전과 같은 향후 C-V2X 애플리케이션에 필요한 고 신뢰성 통신을 방해 할 수 있음
- 우리 연구에서는 SPS에 사용할 무선 자원 선택의 불확실성을 대폭 줄임으로써 C-V2X sidelink Mode 4에서 메시지 충돌을 크게 줄일 수 있음을 보임
- 구체적으로, 우리는 시간 - 주파수 자원 공간에서 다음 시작 자원 위치를 포함하는 "Lookahead"의 사용을 제안함
- 주기적 안전 메시지에 포함된 Lookahead 정보를 교환함으로써, 차량 UE (user equipment)는 다른 UE의 결정에 대한 무지로 인한 대부분의 메시지 충돌을 회피할 수 있음
- 제안된 방식은 패킷의 제어 부분에 Lookahead를 포함해야 하지만, 향후 C-V2X 애플리케이션의 엄격한 신뢰성 요구 사항을 고려할 때 이점은 용납할 수 있음

○ 개요

- The Third Generation Partnership Project (3GPP)에서는 Release 14 표준[40]을 통해 이동통신을 이용해 V2X 통신을 지원하기 위한 표준 (C-V2X)을 발표하였음
- C-V2X에서는 PC5 인터페이스를 통한 차량 간 직접 통신인 V2X sidelink 통신을 지원함
- C-V2X는 IEEE 802.11p의 잠재적인 대체 기술로 생각되고 있음
- Release 14에서는 V2X sidelink 통신을 위해 두 가지의 새로운 통신 Mode들이 도입됨
- 두 Mode는 무선 자원 할당 방식에서의 차이점이 있는데, Mode 3에서는 무선 통신망의 기지국이 각 차량이 V2V 통신을 위해 사용하게 될 무선 자원들을 선택하고 관리함. 따라서 해당 Mode는 각 차량이 기지국과 통신을 할 수 있는 상황 (cellular coverage)에서만 동작이 가능함
- Mode 4에서는 각 차량은 기지국의 도움 없이 자신이 사용할 무선 자원을 선택하고 관리함. 이를 위해서 Mode 4에서는 센싱 기반의 Semi-Persistent Scheduling (SPS) 기법을 도입하였고, 각 차량은 이를 이용해 자신이 사용할 무선 자원을 선택함

- V2V 안전 응용은 cellular coverage와 관계없이 언제나 동작해야 하므로, Mode 4는 C-V2X에서 기본 동작 Mode로 생각됨
- 하지만 현재의 SPS 알고리즘은 상당히 많은 패킷 충돌을 일으킨다는 기존의 연구 결과가 있음[41][42]

○ Sidelink Mode 4에서 충돌 해소를 위한 자원 할당

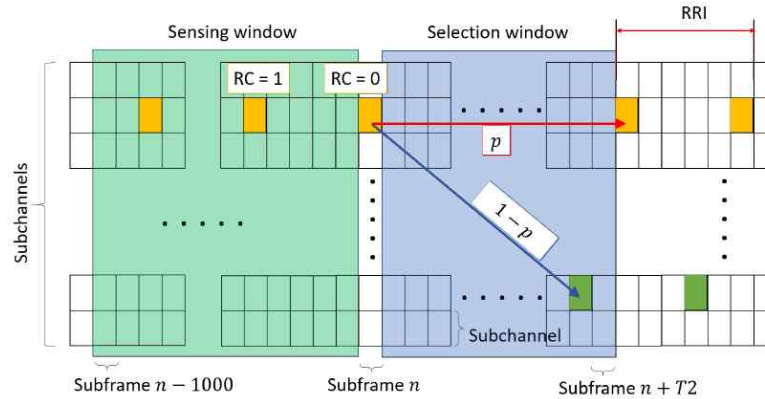


그림 76. C-V2X의 무선 자원들과 SPS 알고리즘에서 자원 선택

- SPS는 지속적인 무선 자원 할당이 요구되는 응용들에서 control channel의 overhead를 줄이기 위한 자원 할당 기법으로, 각 차량에 의해 전송되는 Basic Safety Message (BSM) 등의 안전 응용에 적합하여 Mode 4 통신 표준으로 지정되었음[43][44]
- C-V2X에서 무선 자원은 subframe (1 ms) 단위의 시간 축과 subchannel 단위의 주파수 축, 2차원의 공간에서 할당됨 (그림 76)
- SPS 알고리즘에 의하여 각 차량은 무선 자원에서 시간 축으로 Resource Reservation Interval (RRI) 만큼의 일정한 간격을 가진 무선 자원들을 전송을 위해 선택함. 이때, 각 차량은 Reselection Counter (RC)을 가지고 있어 해당 값이 0이 될 때까지 주기적으로 메시지를 전송함
- RC 값이 0이 되었을 때, 각 차량은 미리 설정된 일정 확률 (probResourceKeep)로 사용하고 있던 무선 자원을 계속해서 사용하거나, 그렇지 않다면 (1-probResourceKeep) 새로운 무선 자원을 선택하여 다시 메시지를 전송하게 됨
- 무선 자원 선택을 위해 각 차량은 계속해서 주위의 무선 채널을 센싱하여 일정한 이전 무선 자원들에 대한 정보들을 수집 및 관리하는데, 이를 sensing window라고 함
- 새로운 무선 자원을 선택할 때, 현재 subframe부터 RRI 보다 작은 범위 내의 무선 자원들인 selection window에서 sensing window가 가지고 있는 정보를

바탕으로 Received Signal Strength Indication (RSSI) 값이 낮은 자원들로 선택 후보군을 생성하고 이들 중 자원을 선택하는 방식으로 다른 차량이 사용하지 않는 자원을 선택하려 함

- 하지만 각 차량이 다음 사용할 자원을 선택했을 때, 다른 차량 역시 해당 자원을 선택할 가능성이 존재하기 때문에, 기존 알고리즘에서 충돌이 발생할 수 있음 (그림 77)

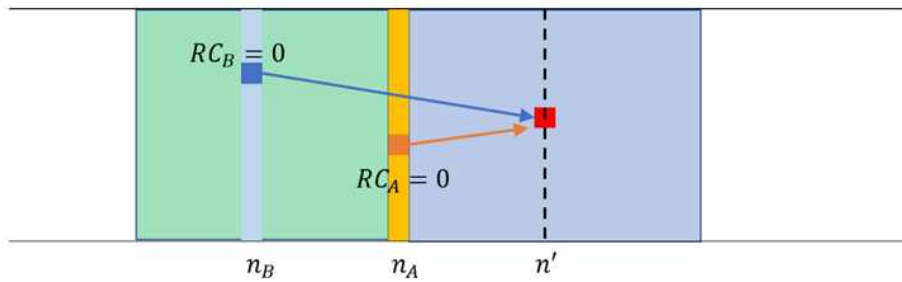


그림 77. 기존 SPS 알고리즘 이용 시 패킷의 충돌이 발생하는 상황

○ SPS/LA 알고리즘

- 수행한 연구에서는 기존의 SPS 알고리즘을 개선해 패킷의 충돌을 줄이고자 하였음
- 개선하여 제안하는 SPS 알고리즘 (SPS/LA 알고리즘)에서는 차량이 다음에 사용할 무선 자원을 미리 선택하고, 전송하는 패킷의 control 정보인 Sidelink Control Information (SCI)에 다음 사용을 위해 선택한 무선 자원에 관한 정보인 Lookahead (LA)를 추가해줌으로써 기존에 발생하는 충돌 상황을 해결하고자 하였음
- LA는 각 차량이 다음에 사용할 무선 자원의 주파수 축 정보인 subchannel 정보와 시간 축 정보인 subframe 값으로 구성되어 있음
- 특정 차량이 새로운 무선 자원을 선택할 때, LA 정보를 사용한다면 sensing window가 가지고 있는 정보의 양이 늘어나기 때문에 충돌을 회피하여 자원을 선택할 수 있음
- 아래의 기존 SPS 알고리즘과 개선한 SPS/LA 알고리즘의 흐름도는 각 차량이 각각의 알고리즘을 사용하여 subframe 마다 센싱 혹은 메시지 전송을 어떻게 하는지를 보여주고 있음 (그림 78, 그림 79)

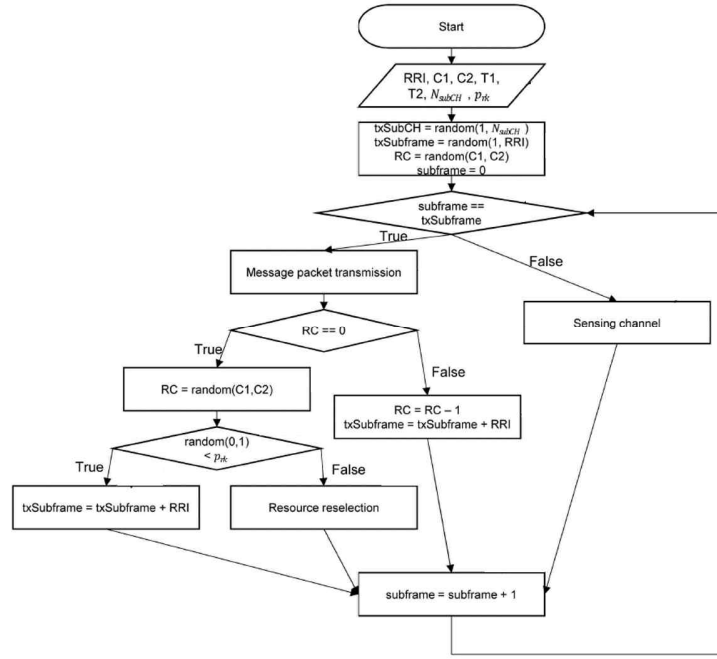


그림 78. SPS 알고리즘의 흐름도

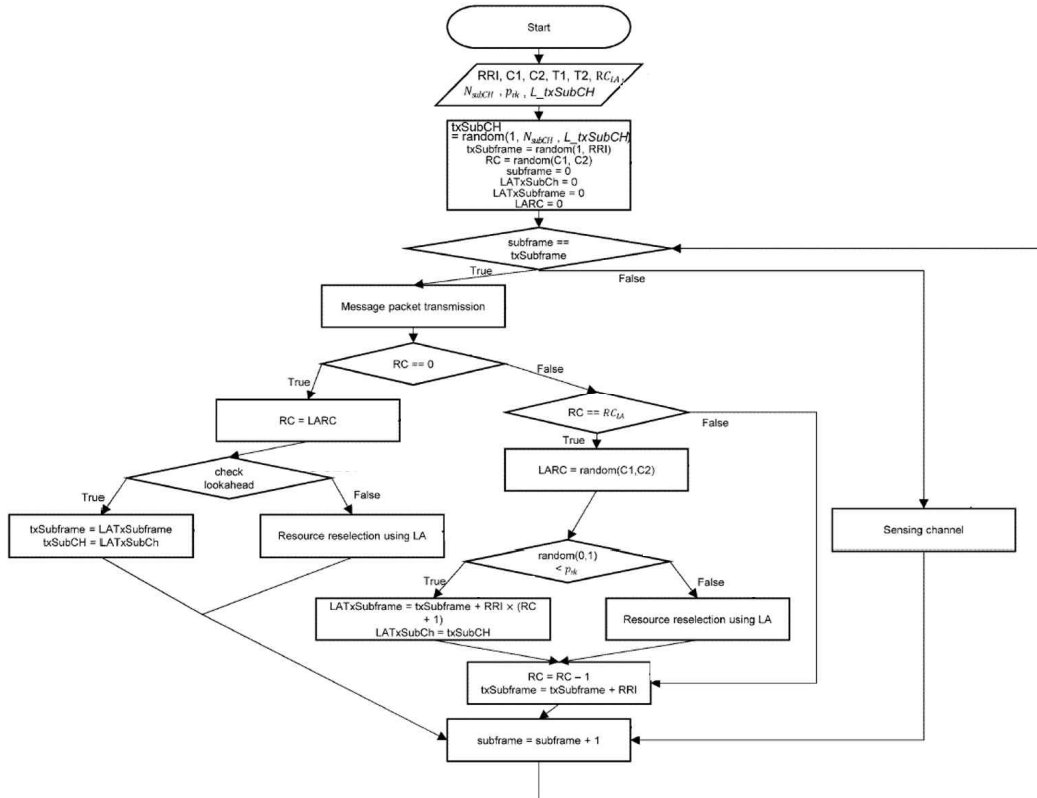


그림 79. SPS/LA 알고리즘의 흐름도

Parameter	Default Value
Retransmission	off
RRI	100 ms
Sensing window	1000 ms
BSM size	300 bytes
RC_{LA}	1
L_{subCH}	1
N_{subCH}	25
$RB/subCH$	8
$T1, T2$	1, 100
$C1, C2$	5, 15
$probResourceKeep$	0

그림 80. 시뮬레이션에 사용된 parameter

○ 성능 평가

- 제안한 알고리즘 성능평가를 위한 시뮬레이션은 Python으로 구현된 자체 제작한 시뮬레이터를 사용하였고, 실험에 사용된 parameter들은 위와 같음 (그림 80)
- 각 시뮬레이션은 100초간 진행되었고, 실험 결과들은 10번의 실험 결과의 평균을 계산한 것임

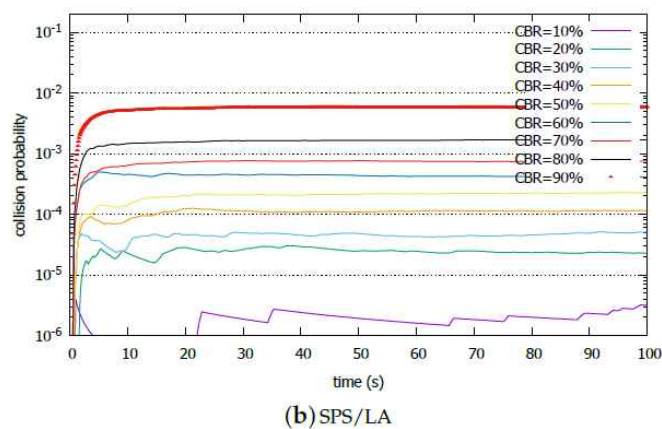
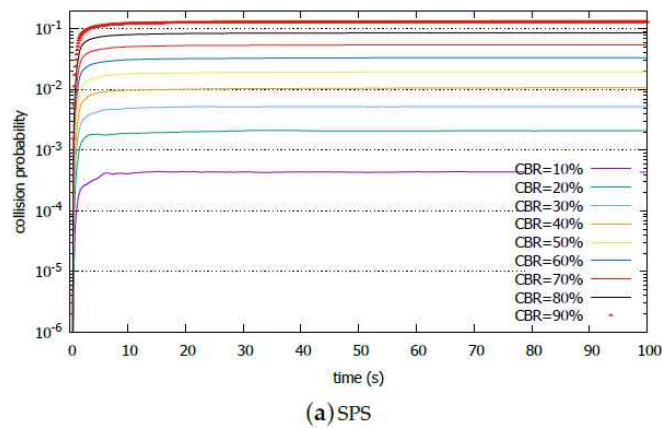


그림 81. SPS와 SPS/LA 알고리즘을 사용할 때, 패킷 충돌률의 비교

- 위의 그래프는 Channel Busy Ratio (CBR)에 따라서 각 시뮬레이션의 패킷 충돌률을 나타낸 그래프임 (그림 81)
- 3GPP의 보고서에 따르면 5G를 이용한 군집 주행 응용의 요구조건에서 90% 이상의 통신 신뢰성을 요구하는데 [45], 기존 SPS 알고리즘을 이용할 경우 CBR이 높아짐에 따라 10% 이상의 충돌률을 보여 요구조건을 만족시킬 수 없음
- 제안하는 SPS/LA 알고리즘을 사용할 경우 패킷의 충돌률을 적게는 10배에서 100배 이상 낮추는 모습을 확인할 수 있는데, 그 예시로 CBR이 90%일 때 0.6%의 충돌률을 보이는 SPS/LA 알고리즘이지만 SPS 알고리즘을 사용하면 12.8%의 충돌률을 보이는 것을 확인할 수 있음

○ 연구 결과

- 이 연구에서는 SPS 알고리즘에서 다음 사용할 무선 자원 선택의 불확실성을 대폭 줄임으로써 C-V2X sidelink Mode 4에서 메시지 충돌을 크게 줄일 수 있었음
- 군집 주행과 같은 미래의 C-V2X 응용에서 엄격한 신뢰성 요구 사항을 고려해 보았을 때, SPS 알고리즘의 성능을 향상시키기 위해 SCI에 LA 정보를 담는 것은 충분히 가치가 있을 것으로 생각됨

(사) 강화 학습을 활용한 J2945 혼잡 제어 알고리즘 성능 향상 연구

○ 요약

- 이전 연구에서는 휴리스틱 (heuristic)한 방식의 접근을 통해 J2945 표준의 혼잡 제어에서 정보 연령을 향상시키기 위한 연구를 수행하였는데, 후속연구로써 데이터 기반의 인공지능 접근 방식을 통한 연구를 수행하고자 함
- 사람이 만든 알고리즘이 주어진 상황과 변수에서 최적의 방식 (local optimal)일 수는 있지만, 그 알고리즘이 해당 문제 상황에서 가장 최적의 방식 (global optimal)이 아닐 수 있음
- 주어진 문제에 최적의 해결책을 찾기 위하여 사람이 직접 변수들을 통제하고 조절하는 것이 아니라, 사람은 목표 (objective)만 설정하면 그 목표를 달성하기 위해 데이터를 기반으로 자동으로 변수들을 조절함으로써 최적의 알고리즘을 찾는 방식인 강화학습 (reinforcement learning)을 이용하고자 함

○ 강화 학습을 활용한 J2945 혼잡 제어 알고리즘 연구

- 강화학습은 에이전트 (agent)가 환경 (environment)의 상호 작용 (interaction)을 통해 현재 상태 (state) 이후 에이전트가 얻어나갈 보상 (reward)들의 총합, 즉 예상 수익 (expected return)이 최대가 되도록 하는 인공지능 기반의 학습 방법임 (그림 82)
- 에이전트는 환경을 관찰 (observation)하여 현재 상태를 구성하고, 그 상태를 바탕으로 환경에 어떠한 행동 (action)을 할지 결정함. 에이전트가 환경에 대해 행한 행동은 환경을 변화시키고, 에이전트는 변화된 환경을 관찰하여 새로운 상태와 환경으로부터 행동에 의한 보상을 받게 됨.
- 에이전트는 주어진 상태에서 행동을 선택하는 방식인 정책 (policy)에 따라서 행동을 선택하기 때문에, 결국 강화학습을 통해 에이전트가 학습하려고 하는 것은 주어진 상태에서 예상 수익을 최대로 만드는 정책임

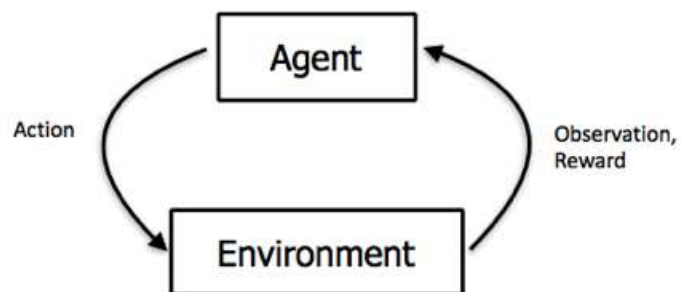


그림 82. 강화학습의 구조도

- 에이전트는 주어진 상태에서 행동을 선택하는 방식인 정책 (policy)에 따라서 행동을 선택하기 때문에, 결국 강화학습을 통해 에이전트가 학습하려고 하는 것은 주어진 상태에서 예상 수익을 최대로 만드는 정책임
- 우리의 문제에서 강화학습을 적용하여 해결할 궁극적인 목표는 WAVE 기반의 차량 간 통신에서 혼잡 제어를 위한 최적의 알고리즘을 구하는 것임
- 그 이전에 J2945 표준의 혼잡 제어에서 사용하는 변수들을 강화학습을 이용해 학습시켜 설정해보고자 함
- 초기 연구로서 강화학습의 고전적인 방식인 table 기반의 학습 알고리즘을 적용하여 간단한 문제를 해결해보고자 하였음
- 전체 실험은 Q-learning 방식을 사용하는 Lua 언어 기반의 에이전트와 QualNet 5.1 버전 시뮬레이터의 환경으로 진행하였음
- 강화학습 문제 구성
- 목적: 혼잡 제어에서 각 차량의 정보 연령 (Information Age)을 향상시키는 것
- 상태 (State): (Channel Busy Percentage (CBP), Vehicle Density (VD), Transmission Power (TxPower), Transmission Interval (TxInterval))
- 행동 (Action): TxPower와 TxInterval의 조절
 (TxPower +, TxInterval +), (TxPower +, TxInterval x), (TxPower +, TxInterval -), (TxPower x, TxInterval +), (TxPower x, TxInterval x), (TxPower x, TxInterval -), (TxPower -, TxInterval +), (TxPower -, TxInterval x), (TxPower -, TxInterval -)
- Table 기반의 학습을 위해서 연속 (continuous)된 값을 가지는 상태의 구성 요소들을 이산화 (quantization)하였음
- CBP와 VD의 경우, 해당 구성 요소를 정수로 이산화함
- TxPower의 경우, J2945 표준에서 설정한 최대, 최소 전송 세기인 10dBm, 20dBm를 1dBm 간격으로 이산화함
- TxInterval의 경우, J2945 표준에서 설정한 최대, 최소 전송 간격인 100ms, 600ms를 50ms 간격으로 이산화함
- 보상 (Reward): 각 차량의 보상은 주변 차량에서 받은 메시지들의 정보 연령의 평균으로 얻는 점수와 높은 CBP로 인한 감점으로 구성되어 있음

$$r_{t+1} = \frac{1}{VD} \left(\sum_w \overline{I_t(w)} \right) - C_t(v)$$

$$\overline{I_t(w)} = \frac{1}{k} \sum_{j=i}^{i+k-1} \frac{650 - l_j}{550} \times \frac{100 - d_j}{100}$$

- $\overline{I_t(w)}$ 는 한 차량이 특정 시점 t 부터 다음 시점 $t+1$ 까지 다른 차량 w 로부터 받는 메시지들의 정보 연령의 평균으로 얻는 보상임. 해당 인자는 최대값이 1이 되도록 정규화 (normalization)되었음
- 차량이 특정 시점 t 부터 다음 시점 $t+1$ 까지 차량 w 로부터 받은 메시지들을 $m = m_i m_{i+1} \dots m_{i+k-1}$ 라고 할 때, 각 메시지 간의 시간 간격은 $l_i = m_i - m_{i-1}$ 이라고 정의
- 차량이 차량 w 로부터 m_i 메시지를 받았을 때, 두 차량 간의 거리를 d_j 라고 정의
- 결국 $\overline{I_t(w)}$ 는 차량이 특정 시점 t 부터 다음 시점 $t+1$ 까지 차량 w 로부터 받은 k 개의 메시지 사이의 간격들에 대해 메시지 사이의 간격이 짧을수록, 메시지를 받았을 때 거리가 더 가까울수록 더 큰 보상을 받게 됨

$$C(v) = \begin{cases} \frac{1}{20} (cbp_v - 80) & \text{if } cbp_v \geq 80 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

- $C(v)$ 는 보상을 받는 차량 v 가 CBP로 인해 받는 감점으로, 80% 이하의 CBP에서는 감점을 받지 않고 80% 이상의 CBP 상황에서 감점을 받는 형태로 구성하였음 (그림 83)



그림 83. 보상 중 CBP로 인해 받는 감점 그래프

- 위의 학습설정을 이용하여 여러 VD가 분포된 시나리오를 반복 실행하여 에이전트를 학습시켰음

○ 연구 결과

- 아래는 학습된 에이전트가 특정 상황에서 TxPower와 TxInterval이 각각 10dBm, 100ms로 고정되었을 때, CBP와 VD에 따른 행동의 분포를 그림으로 나타낸 것임 (그림 84)

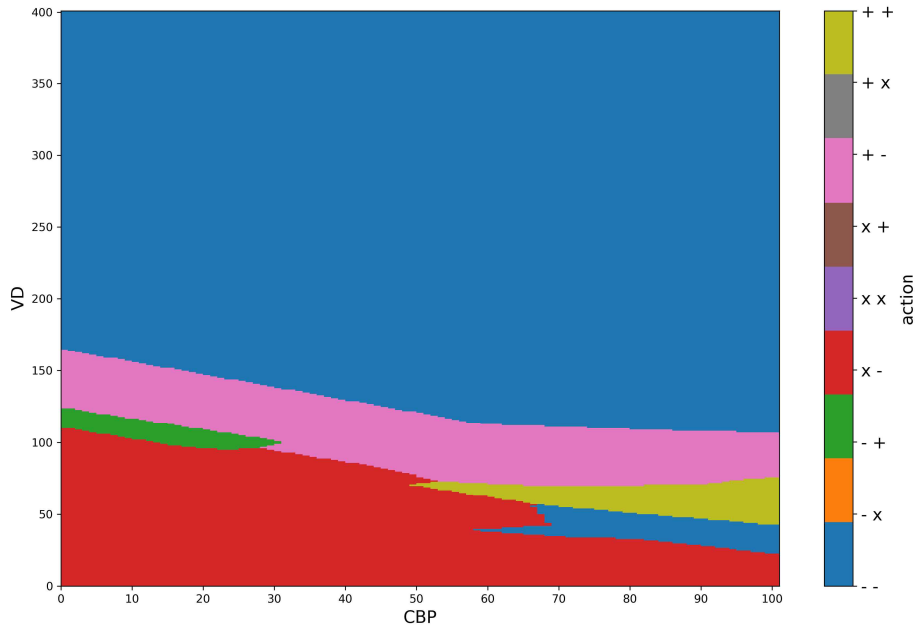


그림 84. TxPower=10dBm, TxInterval=100ms 일 때,
CBP, VD에 따른 행동 선택의 분포

- 현재 table 방식의 학습 방법에서 더 나아가 최근 많이 사용되고 있는 딥러닝 기반의 강화학습 방법을 적용하기 위한 연구를 진행하고 있음
- 또한, 상태와 행동, 보상의 정의를 개선해 나아가며 많은 차량이 혼잡 상황에서 더 나은 정보 연령을 가질 수 있도록 하는 알고리즘을 찾기 위한 연구를 진행할 것임

(아) WAVE 기반 통신에서 Pseudonym 변경 시 IP 통신의 연결을 유지하도록 하는 연구

○ 요약

- WAVE 기반 통신에서는 privacy를 보호하기 위한 목적에서 pseudonym을 사용하고 이를 주기적으로 교체하도록 표준화 함.
- pseudonym을 교체하는 과정에서 re-addressing이 Multicast Listener Discovery, Duplicate Address Detection, TCP retransmission와 같은 TCP/IP 프로토콜의 구성요소에 영향을 미치게 됨
- 이는 privacy를 지키면서도 IP 통신의 성능에 영향을 미치지 않도록 구현해야함. 이를 위하여 우리는 Multipath-TCP (MPTCP) 기반의 접근을 통해 문제를 해결하려고 함

○ 개요

- IEEE WAVE 프로토콜에서 IEEE 1609.2 표준은 기술의 보안 요소를 다루고 있으며, 이는 보안 인증서를 통한 전송자 인증, 메시지 무결성, 기밀성을 포함하고 있음. 추가적으로 privacy 부분에 대해 인증서를 교체하는 부분에 대한 내용을 포함하고 있는데 이는 운전자의 신원을 추적할 수 없도록 함
- 이러한 방식은 WAVE Short Message Protocol을 위한 해결 방법이며, TCP나 UDP와 같은 IP 기반의 통신 방식에서는 각 계층의 identifier인 IPv6 주소와 MAC 주소, 포트 번호 등을 변경해야함.
- SAE J2945/1 표준에서는 WSMP safety message에 대한 re-addressing을 5분 또는 2km 이동 거리 내에 수행할 것으로 표준화하였기 때문에 이 주기에 맞추어 IP를 통한 통신에서도 동일한 조건을 가지고 변경되어야 함
- 이 과정에서 발생하는 문제점이 IP 기반의 통신에서 identifier의 변경은 TCP 연결이나 UDP 통신을 종료하는 문제를 발생시키는 것임. 이는 사용 중인 IP와 포트 번호가 변경되기 때문에 발생하는 현상임
- 이 연구에서 TCP/IP 통신에서 IP 주소를 변경하더라도 통신 중인 연결이 끊어지지 않도록 하는 연구를 수행하며, 특히 TCP 통신에 집중하여 연구를 진행함. 이는 IP security (IPSec)과 같은 기법을 사용하는 경우 transport와 application 계층의 데이터와 헤더 부분에 masking이 가능해지며 이를 통해 인증서 변경 이후 linkability의 생성을 억제할 수 있음. 또한 UDP의 경우 IP re-addressing으로 인한 문제를 서버 측의 설정을 통해 차량에서 전송되는 datagram을 수신할 수 있기 때문임
- 비록 TCP 통신이 많은 WAVE 시나리오에서 패킷의 손실과 에러가 높거나 그리고 연결 유지 시간이 적기 때문에 적절하지 않은 통신으로 간주되며, UDP를 사용하는 것으로 가정하지만 이는 응용 계층으로 TCP의 역할을 이동시키는 것

에 불과함

- TCP는 무선에서 손실에 대해 많은 연구를 수행하였으며, 그 중 MPTCP가 하나의 기법임. 우리는 MPTCP를 활용하여 문제를 해결하려고 하며, MPTCP는 DSRC 외에 cellular와 같은 추가적인 무선기술을 도입할 것이기 때문에 차량 네트워크에 적용될 것으로 예상됨

○ MPTCP를 사용하는 IP readdressing 대처 방법

- IEEE 1609 표준에 따르면 다른 프로토콜 계층(IP와 MAC)의 identifier들의 변경은 인증서 변경과 동기화 되어 수행되어야 하며, 이 과정에서 클라이언트 측에서 변경될 IP 주소가 서버측에 알려져야 함
- 이를 위하여 여러 개의 interface간에 handover가 가능하도록 설계된 MPTCP를 사용함. MPTCP는 동일한 물리 계층의 경로에서 handover가 가능하도록 설계되어 있지 않는데, 이는 동일한 경로를 사용하는 통신이 여러 path를 가져야 할 이유가 없기 때문임. 이로 인해 MPTCP에는 link-local 주소에 대해 handover를 허용하지 않고 있음
- 하지만 우리는 re-addressing으로 인해 동일한 interface에 IP가 변경되는 경우에 handover가 수행되어야 하기 때문에, IPv6 link-local 주소에 대해서 handover하도록 수정함. 이는 동일한 인터페이스를 사용하는 새로운 IP 주소가 다른 물리 계층을 사용하는 것으로 다뤄지도록 하여 구현되었음. 이를 통해 re-addressing 이후 MPTCP가 이전 IP 주소를 사용하는 TCP 연결 (MPTCP내 subflow)을 사용하지 않고 다른 IP 주소의 subflow를 통해 사용하도록 함
- 이는 두 단계를 통해 진행되는데, 새로운 subflow를 추가하고 이전의 subflow를 삭제하게 됨. 이후 새로운 subflow에서 통신을 시작하게 되는데, 이때 생성한 subflow로 통신을 시작하기 위해 새로운 subflow에서 unacknowledged 패킷을 전송하는 형태로 새로운 경로의 생성을 서버측에 알리고 이 경로로 전송이 시작될 수 있도록 함

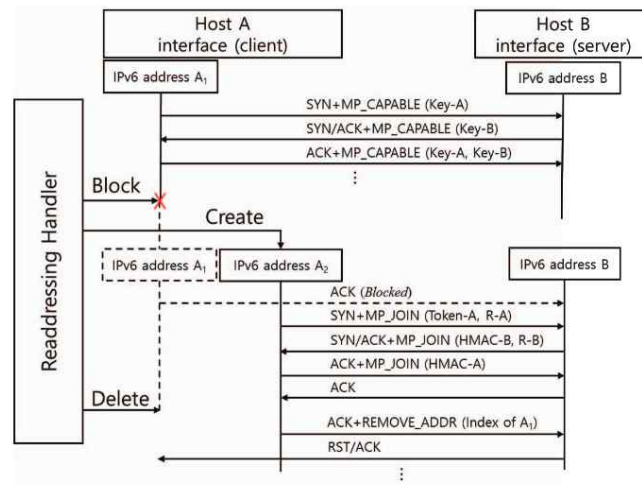


그림 85. MPTCP 기반 IP Readdressing 순서도

- 이 과정은 그림 85과 같은 순서로 진행되는데, 처음 3개의 메시지를 통해 MPTCP 사용이 가능한 것을 서버와 클라이언트가 확인 및 연결을 수립하게 됨. 이후 IP re-addressing 요청을 처리하는 과정에서 클라이언트는 A1 주소를 사용하는 경로를 통한 전송을 중단한 이후 새로운 A2 주소를 생성함.
- 그림 86에서 확인할 수 있듯이 서버로부터 A1 주소에 대해 전송중인 패킷이 있는 경우 MPTCP의 path manager가 이전 주소로 전송되는 패킷에 대한 acknowledgement (ACK) 패킷 전송을 시도하게 됨. 이 전송은 pseudonym 변경에 중요한 문제를 발생시킴. A1을 사용하는 전송이 막혀있는 상태에서, 새로운 MAC 주소 M2가 생성되고 이때 (A1, M2)로 전송이 가능한 상태가 됨. 이 전송 이후 주소 A2가 생성되면 (A2, M2) 주소 쌍을 모두 공격자가 확인할 수 있게 되므로 아래 그림과 같이 linkability가 성립하게 됨. 이러한 이유로 주소를 변경하는 과정에서 이전 주소를 사용하는 모든 패킷을 버리도록 구현함

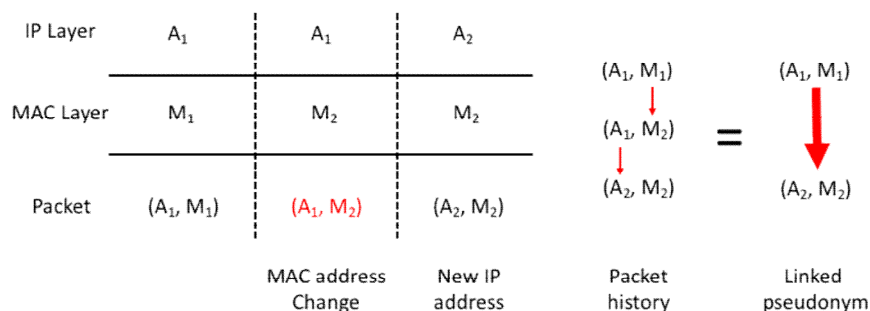


그림 86. Pseudonym 변경 과정에서 패킷 전송으로 인한 linkability 생성 도식 (그림 다시 확인 - 검은색으로 나옴)

- Pseudonym 변경 과정에서 A_2 주소가 생성된 이후 MP_JOIN 패킷을 전송함으로써 새로운 경로의 추가를 요청함. 이후 이전 A_1 주소를 삭제하기 위해 REMOVE_ADDR 패킷을 전송하여 이전 주소를 통한 연결을 서버 측에서 삭제할 수 있도록 함. 또한 클라이언트 측에서도 이전 주소인 A_1 을 삭제함으로써 사용될 수 있는 가능성을 제거하는 작업을 수행함
- 앞서 언급된 것처럼 pseudonym 변경 과정에서 이전 경로로 전송된 데이터는 이전 주소를 사용하는 subflow를 통해서 획득된 이후 ACK 패킷이 전송되지 못하였기 때문에, 새로 생성된 subflow로 패킷을 복사한 이후 새로운 경로를 통해 해당 패킷을 수신한 것으로 ACK 패킷을 전송하는 작업을 수행하게 됨
- MPTCP에는 새로운 경로를 추가하는 메시지 형식으로 MP_JOIN이 아닌 ADD_ADDR도 존재하는데 이 방식은 상대방에게 연결 가능한 주소를 알려주고 상대방이 연결을 시작하는 형태로 사용이 가능함. ADD_ADDR 타입을 통한 새로운 경로의 추가는 TCP의 option 영역을 통해 새로운 주소를 알려주게 되는데 이러한 형태로 인해 새로운 주소가 노출될 가능성이 있을 뿐만 아니라 상대방이 연결 수립을 시작하기 때문에 느린 반응 시간을 가지게 됨
- 그림 87에서는 MPTCP를 활용한 pseudonymity 변경을 위해 Linux Kernel에서 수정한 함수들을 나타내는 그림임. 수정한 함수들은 pseudonym 변경을 위한 경우에만 동작할 수 있도록 조건을 삽입해야 함. 이러한 동작이 아닌 경우 WAVE 외의 환경에서는 문제를 발생시킬 가능성이 있음

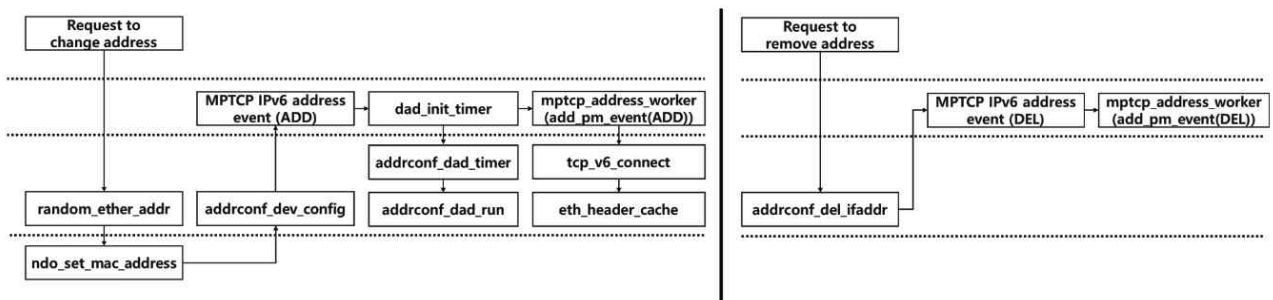


그림 87. Linux Kernel 내 Pseudonym 변경 과정의 함수 호출 순서
MAC과 IPv6주소 변경(좌), IP주소 삭제 (우)

- MPTCP를 사용하는 과정에서 추가적으로 확인한 3가지 문제점으로 시스템 내부적으로 MAC 주소의 불일치, 새로운 주소의 사용 및 MPTCP subflow의 활성화가 지연되는 현상, Multicast 주소 전송으로 인한 문제가 있음
- MAC 주소의 불일치는 커널 내에서 사용하는 주소와 디바이스 드라이버에서 관리되는 주소의 불일치로 인해 발생하게 되는데 커널 내에서 디바이스 드라이버의 초기화 이후 MAC 주소가 변경되지 않고 사용되는 것으로 가정하는 구조로 인해 디바이스 드라이버의 주소 변경을 인식할 수 없으며 이로 인해 수신

되는 패킷을 버리는 문제가 발생함. 또한 동일한 가정으로 인해 패킷 전송과정에서도 디바이스 드라이버의 MAC 주소를 사용하는 것이 아닌 cache된 이전 주소를 사용하여 MAC 계층의 헤더를 추가한 이후 전송을 수행하는 구조로 구현되어 있기 때문에 두 부분에 대한 MAC 주소 변경이 수행되는지 확인할 필요가 있음

- 새로 생성한 IPv6 주소를 사용하기까지 대기 시간이 매우 길게 나타나는 현상을 발견했으며 이 과정이 RFC 4862에 정의된 RetransTimer로 인한 것을 확인함. 이는 새로운 link-local 주소를 생성한 경우 해당 주소의 중복 사용을 확인하기 위한 패킷 전송 및 1 초의 대기 이후에 사용을 하는 형태의 동작을 의미하며, WAVE 시스템에서는 IP 통신의 빠른 사용을 위해 조금 더 짧은 지연 시간 이후에 사용할 수 있을 것으로 생각됨
- 다른 지연의 원인은 MPTCP 내에서 새로운 subflow를 추가할 때 새로운 경로를 활성화하기 이전에 500ms를 기다리기 때문에 발생하는데 이는 새로운 subflow를 생성하기 이전에 이전의 연결에서 필요한 전송이 모두 수행될 수 있기 때문에 기다리는 형태로, 우리의 상황에서 필요하지 않는 기능이기 때문에 이로 인한 지연은 모두 없도록 수정함
- 마지막 지연의 원인은 앞서 언급된 두 가지와 함께 발생하는 것으로, 새로운 경로를 생성하는 과정에서 앞선 요인들로 인해 약 1.5 초의 지연이 발생하지만 이보다 더 긴시간 이후 전송이 시작되는 과정에서 확인한 것으로, 기존의 경로를 통해 ACK 패킷을 전송하려 하지만 해당 패킷을 전송하지 못하도록 하였기 때문에 내부적으로 재전송 타이머를 2배씩 증가시키며 재전송을 수행함. 이 과정에서 1.5초 이전에 재전송을 실패하고 타이머가 2배로 증가되었기 때문에 1.5초를 지난 시점에 재전송이 새로운 경로를 통해 수행되고 통신이 재개됨을 확인함
- Multicast 통신을 지원하기 위해 ICMPv6는 link-local 주소가 추가되거나 삭제되는 경우에 Multicast Listener Discovery (MLD) 메시지를 전송하게 됨. MLDv2에서는 패킷 전송의 개수를 줄이기 위해 여러 multicast 주소를 하나의 패킷에 담아서 보내게 되는데, 우리의 솔루션을 적용한 경우 MLD 패킷 내 이전 주소와 새로운 주소가 같이 기록되어 있는 것을 확인함. 이는 이전 주소와 새로운 주소를 link 시키는 문제를 가지고 오게 되며, 분할하여 전송하는 경우 MAC 주소 변경 이전에 LEAVE 메시지를 전송하고 새로운 MAC 주소와 IP 주소 생성 이후에 JOIN 메시지를 전송하지 않는다면 역시 link가 생성될 수 있는 문제를 가지고 있음. 해당 문제는 추가적인 연구를 통해서 해결할 수 있을 것으로 판단하여 본 연구 내용에서 다루지 않음
- 테스트는 실험용으로 제작된 OBU 장비를 확보하지 못한 관계로 리눅스 운영체제에 환경 구성 및 코드를 작성하여 테스트를 진행하였음. 5분과 2km 이동거

- 리에 대한 조건과 상관없이 소프트웨어적으로 주소를 변경하는 작업에 대한 연구이기 때문에 매 5초마다 주소를 변경하도록 설정하여 실험을 수행함
- 서버에서는 클라이언트로 100 MB를 전송 하도록 하며, 클라이언트 측에서 주소 변경 작업을 수행하게 됨. 우리가 제안하는 방식은 MPTCP-based IP Readdressing (MIR)로 표기하며 MIR-fast는 앞서 언급한 2가지 지연 요소를 최소화 한 설정 상태임

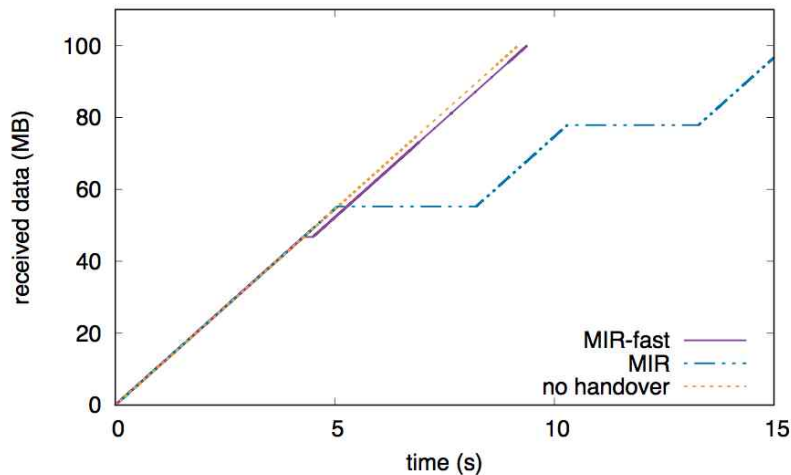


그림 88. Client 측에서 수신한 데이터에 대한 acknowledgement 양

- 그림 88에서 handover가 없는 경우에는 9.17s 정도의 전송 시간에 서버의 전송이 모두 수행되었음, 매 5초에 re-addressing이 수행되는 상황에서 MIR 방식에서는 1.5초의 client 측 지연과 이때 2배씩 누적되어 생긴 1.5초의 서버 측 지연으로 인하여 매우 짧은 시간 전송을 수행한 이후 다음 re-addressing이 수행되게 됨. 이러한 5초 주기의 re-addressing은 발생하지 않지만 매 re-addressing을 수행하는 과정에서 초 단위의 지연이 생기는 것은 적절하지 않은 접근임
- 지연의 요인을 최소화한 MIR-fast의 경우 클라이언트 측의 지연을 최소화시킴으로 인해 서버 측의 재전송 타이머의 누적이 적게 발생되었고, 새로운 경로를 생성한 이후 즉각적으로 다시 데이터 전송이 시작됨을 확인할 수 있음. 이 연구를 통해 WAVE 환경에서 re-addressing이 수행되어 IP 세션이 종료되는 문제에 대한 해결 방안을 보임

○ 연구 결과

- pseudonym을 변경하면서 IP 세션을 유지하는 것은 생각보다 매우 어려운 것을 확인함. MPTCP를 통한 접근으로 IP 통신을 유지하며 pseudonym을 변경하는

것이 가능함을 보였지만, 이 과정에서 확인해야 하는 구성요소로 IP multicast, DAD, TCP 재전송, 커널 내 주소 처리가 있음. 이 구성요소들에 대해 조심하여 처리하지 않는 경우 IP 기반의 통신에 문제를 발생시키거나 privacy에 영향을 줄 수 있음. 이 연구 결과가 WAVE 환경에서 pseudonym 변경에 가이드라인이 될 수 있기를 기대함

(자) 저전력 beaconing을 통한 차량 간 메시지 내용 유효성 검사 연구

○ 요약

- 새롭게 출시되는 경차에 차량 환경에서의 무선 접속 (Wireless Access in Vehicular Environment, WAVE)을 제공하도록 2020년 이전에 의무화될 것으로 예상됨에 따라, WAVE 사용이 마침내 현실화 되고 있음
- 그러나 여전히 WAVE 표준에서 다루지 않는 보안 문제 (메시지 내용 유효성)가 있음
- 문제는 수신된 안전 메시지의 내용을 신뢰할 수 없다는 점이며 이는 공격자가 수신하는 차량의 안전하지 않은 응답을 유발하기 위해 잘못된 값을 위조했을 수 있기 때문임
- 센서 융합, 행동 분석 및 통신 제약 검사를 기반으로 한 솔루션 접근 방식이 있지만 이러한 문제로 인해 문제가 완전히 해결되는 것은 아님
- 우리 논문에서는 원격 길가의 공격자를 무효화하기 위해 차량 식별자의 저전력 전송을 사용하는 통신 기반 점검 기법을 제안함
- 전적으로 WAVE 프레임워크에 구축되어 기존의 센서 융합 기반 또는 동작 기반 검사를 적용할 수 없는 경우에도 사용할 수 있음
- 우리 연구에서 원격 허위 메시지 공격 상황에서 제안하는 기법의 가치를 입증하였고, 제안하는 접근법은 추가적인 하드웨어 기능을 필요로 하지 않으며, 단지 약간의 채널 이용률을 증가시킴

○ 개요

- WAVE에서 각 차량의 위치, 속도 및 방향을 보고하는 주기적인 "비콘" 또는 기본 안전 메시지 (Basic Safety Message, BSM) [4]가 협력적인 주변 차량 인식을 위해 중요함
- BSM 메시지는 전방 충돌 경고 (Forward Collision Warning, FCW) [46]와 같은 운전 안전 응용 프로그램을 즉시 사용할 수 있도록 하기 때문에, BSM 메시지의 안정적이고 효율적인 전달은 주행 안전을 향상시키는 데 필수적임
- IEEE WAVE 표준은 BSM 메시지의 주기를 지정하지 않지만, 문헌에서 일반적인 주파수 범위는 1 Hz ~ 10 Hz 임
- 차량용 통신을 위한 WAVE 프레임 워크는 IEEE 1609 [35], [47], [48], IEEE 802.11 [49] 및 SAE J2735의 세 가지 표준을 기반으로 함
- 특히, IEEE 1609.2는 송신자 인증, 메시지 무결성 및 기밀성을 제시하는 기술의 보안 측면을 다루고, IEEE 1609.4는 개인 정보 보호를 위한 Medium Access Control (MAC) 주소 익명성에 대해 다룸
- 불행하게도 현재의 표준에서는 메시지 내용의 유효성에 대한 한 가지 중요한

문제가 아직 해결되지 않았음

- 따라서 우리 논문에서는 수신자가 수신된 메시지 내용을 신뢰할 것인지 여부를 확인할 수 있는 방법을 조사하며 이는 IEEE 1609.2에 의해 다루어지는 송신자 인증과는 다른 문제인데, 이는 보낸 사람이 유효한 자격 증명을 가지고 있다고 해도 반드시 메시지 내용을 신뢰할 수 있다고 보장 할 수는 없기 때문이다
- 메시지에 불합리한 내용이 들어있는 데에는 두 가지 이유가 있음
- 첫 번째는 오류 또는 오작동 감지로 예를 들어 Global Navigation Satellite System (GNSS) 오류로 인해 메시지를 보낸 사람이 잘못된 좌표를 제공 할 수 있음
- 두 번째는 공격자가 전송된 메시지에 의도적으로 잘못된 값을 넣는 악성 공격인데 이는 첫 번째 것과 달리 예측 및 제어를 할 수 없기 때문에 매우 중대한 위협이며 공격자는 의도적으로 수신기 차량이 오류 메시지 내용에 반응하도록 하여 충돌과 같은 심각한 결과를 초래할 수 있음
- 메시지 유효성 검사의 문제점은 오랫동안 계속되어 왔으며, Vehicle-to-Vehicle (V2V) 통신 기술의 시작부터 데이터 위조는 심각한 안전상의 결과를 초래할 수 있는 것으로 나타남 [50] [51]
- 심지어 데이터 위조는 구현 및 실행이 용이하여 가장 심각한 보안 위협으로 간주됨
- 예를 들어, 해커는 "유령 차량"의 잘못된 위치 메시지를 조작하여 긴 군집의 형태로 여러 차량 그룹을 만들 수 있음 [52]
- 또한, 해커는 전략적으로 가장하여 멀티 홉 메시지 (multi-hop messages)를 라우팅을 위한 적절한 위치에 있는 척 하여 도용 (hijack) 할 수도 있음 [53]
- 데이터 위조는 웹홀을 통해 일어날 수도 있고, 셀룰러 네트워크를 통해 중계 (relayed) 및 재생 (replayed) 될 수도 있음
- Sensor-fusion [54] [55], 행동 분석 [56] 및 통신 기반 제약 검사 [57] [58]와 같은 세 가지의 문제 해결 방식이 존재하였음
- 우리 논문에서는 고정된 길에 공격자를 방어하기 위해 저전력 통신의 물리적 제약에 기반한 세 번째 범주의 접근 방식을 제안함
- 비록 다른 두 가지 접근방식을 조합하여 사용하는 것을 배제하지 않지만, 다른 두 가지 접근 방식보다 세 번째 접근 방식이 유리한 점이 있음
- 첫째, non-line-of-sight (NLOS) 조건과 같이 센서 기반 위치 확인이 작동하지 않는 경우에도 작동 할 수 있으며, 이는 카메라, 레이더 및 레이더와 같은 대부분의 차량 센서가 LoS 장치이기 때문에 유리한 조건임
- 둘째, 행동 분석이 실패할 때 작동 할 수 있는데, 하나의 행동 분석은 움직이는 행동을 나타내지 않기 때문에 정지된 차량에는 적용할 수 없음

- V2X는 가까운 장래에 규정된 안전 기능이 될 것으로 예상[39]되므로 다른 추가 검사와 상관없이 통신 기반 위치 확인이 포함되어야 한다고 생각하고, 우리의 기법은 WAVE 프레임워크에서 완전히 구현될 수 있음
- 우리 제안의 핵심 아이디어는 작은 전송 (Tx) 전력으로 전송된 주변 차량의 메시지가 발신자의 즉각적인 근접에만 도달한다는 물리적 통신 제약에 기반함
- 이 것은 공격자의 통신 범위 (예. 300 m)를 이용하는 기존의 통신 기반 접근 방식과 대조되며 다음에서 제안된 기법을 논의하기 전에 메시지 내용 타당성 검사 문제에 대한 기존 연구를 간략하게 논의하고자 함
- 메시지 내용 유효성 검사 문제, 특히 위치 확인에는 단독으로 또는 조합하여 사용할 수 있는 세 가지 방법이 있으며, 그들은 행동 분석, 센서 융합 및 통신 제약 검사를 기반으로 함
- 첫 번째는 차량 운동 동역학의 물리적 제약을 이용하는 기법 기반이고, 두 번째는 여러 센서 입력을 사용하여 수신된 메시지의 위치 정보를 확인하는 기법 기반이며, 세 번째는 최대 통신 범위 제약 조건을 사용하는 기법임
- 칼만 필터를 사용하여 주변 차량의 행동을 분석하여 위치 정보를 확인하는 방법이 있는데, 칼만 필터가 매우 동적인 움직임을 놓치는 단점이 있어 갑작스런 추월 및 제동을 확인하기 위해 Hidden Markov Model (HMM)을 추가로 활용함
- 센서 융합 및 입자 필터를 사용하여 들어오는 메시지의 위치 정보와 메시지 전송 수단에 신뢰 수준을 할당하는 기법도 존재함
- 메시지 유효성을 확인하기 위해 레이더, 라이다 및 초음파와 같은 다른 센서 모듈의 유효성 등급을 결합하는 휴리스틱 프레임워크를 제안하는 연구가 있음
- 레이더 센서를 통해 받은 메시지의 위치 정보를 확인하고, 도로를 셀로 세분화하고 셀 리더의 역할을 하는 중앙 차량을 사용하여 셀의 차량 위치를 확인하고 전파하며 셀 리더는 원격 셀에 있는 차량의 위치 정보를 확인하기 위해 원격 셀과 통신 하도록 하는 연구가 있음
- 잘못된 위치 공격을 막고 GPS 참조 값을 제공하기 위해 노변기지국 (Road Side Unit, RSU)에 의존하는 연구도 존재함 [59]
- 차량이 암호를 사용하여 상호 확인함으로써 통신 범위에 있음을 보장하는 기법이 있음
- 정직한 다수의 사람들보다 두드러지지 않는 위치 (예. 최대 전송 범위를 벗어나는)를보고하는 공격자를 퇴거시키는 기법이 존재함
- 문제 차량의 다른 행동 이상에 무선 통신 제한을 하는 기법 [60]과 고정된 길 가 공격자로 간주되지 않고 신뢰되기 위해서는 최소 거리 이동 (Minimum Distance Moved, MDM)라고 불리는 최대 통신 범위의 두 배 이상 동안 주변 차량들에게 BSM을 전달하도록 요구하는 기법이 있음

○ 저전력 비콘을 통한 주변 차량 확인

- 고정된 길가 공격자로부터의 위치 데이터 위조 공격으로부터 방어하기 위해 근접 증명 목적으로 저전력 beconing을 사용하는 것에 대한 제안을 논의함
- 제안하는 기법은 세 가지 바람직한 특성을 갖는데 첫째, 기존의 WAVE 온보드 유닛 (On-Board Unit, OBU)을 능가하는 새로운 하드웨어 구성 요소가 필요하지 않고, 둘째, BSM을 사용하는 정상적인 beconing 활동을 방해하지 않기 때문에 채널 사용을 과도하게 증가시키지 않으며, 셋째, 센서 융합이 적용될 수 없는 경우와 동작 기반 검사가 적용되지 않는 고정된 공격자에 대해 작동함
- 그림 89는 길가의 정직한 2 대의 차량 U와 V의 움직임과 길가에 두 명의 공격자 K와 K'의 움직임을 보여줌

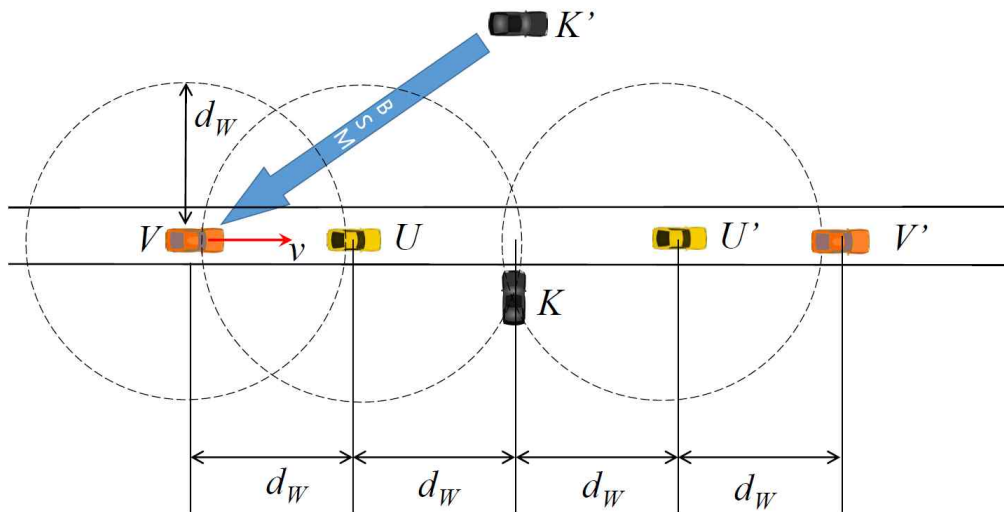


그림 89. 저전력 beacon 검사 설정

- 공격자 K'는 잠재적 피해자 V로부터 BSM 신호가 도달할 수 있는 최대 거리인 d_B 보다 가까움
- 공격자는 증폭기 또는 지향성 전송을 사용하여 표준 송신 전력 (예. 23 dBm)을 높이거나 d_B 를 높일 수 있음
- 제안된 저전력 beacon 검사 방식이 없으면 공격자 K'는 BSM에 잘못된 위치 또는 기타 안전에 중요한 거짓 정보를 주입하여 V가 이를 믿고 급제동과 같이 위험하고 불필요한 반응을 유도할 수 있음
- 그러나 제안된 저전력 beconing에서 각 차량은 저전력 beacon 범위 인 $d_W \ll d_B$ 내에 있는 차량만 신뢰하도록 설계됨
- 주변 차량의 BSM 위치 정보가 아닌 무선 통신의 물리적 제약 조건을 통해 데이터의 유효성을 확인함

- 메시지 송신 전력은 WAVE Short Message Protocol (WSMP)의 응용 프로그램에 의해 명시적으로 제어될 수 있기 때문에 새로운 하드웨어 추가 또는 표준 WAVE OBU의 수정이 필요하지 않음
- 우리의 솔루션 접근 방식에서, 각 차량은 송신기의 무작위로 선택된 식별자를 포함하는 특별 beacon을 훨씬 낮은 송신 전력으로 전송함
- 편의상, 우리는 이 논문의 나머지 부분에서 이 특별한 비컨을 "속삭임" (whisper)이라고 부를 것임
- 주변 차량으로부터 받은 속삭임 식별자를 차량이 다시 주변 차량들에게 속삭임을 하는 경우에만, 속삭임 식별자에 해당하는 주변 차량들이 신뢰를 얻음
- 위의 그림에서 K'는 V와 d_w 이상 떨어져 있어 V의 속삭임을 듣지 못하고 따라서 K'는 속삭임에 V의 식별자를 포함 할 수 없음
- 결과적으로 V는 의심스러운 K'의 BSM을 거부함
- 공격자가 거짓 위치 공격을 수행하려면 길가에 d_w 거리 내에 있어야 하며 또한 지나가는 차량과 속삭임을 교환해야 함
- 예를 들어 위 그림에서 공격자 K는 공격을 할 기회를 갖지만 가능한 거리는 원칙적으로 $2d_w$ 로 제한됨
- 따라서 d_w 가 충분히 작으면 공격자의 기회를 최소화 할 수 있으며, 이 기본 계획의 확장을 도입하여 공격 가능 거리를 d_w 내로 더욱 제한 할 수 있음
- 마지막으로, 속삭임에 작은 Tx 전력을 사용하는 것이 바람직한 이유는 채널 이용률의 증가를 작은 값으로 억제하는 데 도움이 된다는 것임
- 따라서 이 보안 메커니즘이 추가된 경우에도 일반 BSM에 채널 대역폭의 더 많은 부분을 할당할 수 있음
- 공격자는 움직이지 않고, 길가에 있으며 고정된 공격자는 구현 및 실행의 복잡성이 낮기 때문에 가장 위험한 공격이 될 수 있음
- 전송 전에 공격자는 센서 또는 Controller Area Network (CAN) 버스와 같은 차량 내 네트워크에서 가져온 데이터를 조정할 수 있음
- 공격자는 유효한 자격 증명을 가지고 있고, 따라서 공격자는 거짓 위치 데이터를 올바르게 인코딩 할 수 있음
- 공격자는 멀리 있는 차량에 영향을 주기 위해 송신 전력을 높이거나 지향성 송신을 사용할 수 있음
- 차량의 빠른 이동성 때문에 공격자는 수신 거리를 움직이는 표적까지 확장 할 수 없음
- 속삭임을 사용하는 주변 검사는 각 차량의 가까운 주변에서 발생하는 안전 관련 이벤트에 초점을 두고, 정확하게는 속삭임의 두 홉 거리임
- 공격자가 속삭임의 두 홉 거리에 오지 않는 한 "유령 차량"을 배치하지 못하게 함

- 대부분의 안전에 중요한 이벤트의 경우, FCW와 같이 아주 가까운 거리에서 일어나므로 속삭임 거리에서의 공격 예방이 충분함
- 차량이 먼 거리의 메시지에 주의를 기울여야 하는 안전 애플리케이션도 있으나, 그 점에 대해서는 다루지 않도록 함
- WAVE 프레임워크에서 모든 차량은 주기적으로 BSM이라는 beacon을 최대 10 Hz로 전송함
- 이 논문에서, 우리는 또한 모든 차량 V 가 W_V 로 표시된 특별 beacon을 전송하여 다음 세 가지 정보를 전달할 것을 요구함
 - ☞ I_V : V 의 속삭임 식별자 (WID)
 - ☞ L_V : V 가 수신한 WID 목록
 - ☞ $dig(C_V)$: V 의 인증서 요약
- 속삭임 식별자 I_V 는 차량에 의해 무작위로 선택되며 매 시간 간격 t_u 마다 변경됨
- 만일 변경되지 않는다면 공격자가 I_V 를 한 번 알아내면 이를 사용하여 V 를 공격 할 수 있음
- 모든 차량 V 는 속삭임 검사를 통과 한 속삭이는 주변 차량 식별자 I_x 를 L_V 에 포장하고, 속삭임 W_V 로 재전송함
- W_V 의 수신기 U 가 L_V 의 속삭임 식별자 I_U 를 찾으면 U 는 V 의 후속 beacon인 BSM_V 의 내용을 신뢰함
- 편의상, 우리는 속삭임을 사용하여 주변 차량 검사를 하는 것을 단순히 "속삭임 검사"로 지칭 할 것임
- 반면에 이웃 차량이 속삭임 검사에 실패하면 WID는 저장되거나 재전송되지 않음
- V 의 한 홉 속삭임 주변 N_V 는 속삭임이 도달하는 최대 거리를 기반으로 정의되고 $N_V^t \subseteq N_V$ 는 속삭임 체크를 통과 한 한 홉 주변차량의 부분 집합임
- W_V 속삭임 검사를 통과하면 결국 차량 V 자체에 대한 신뢰 형성으로 이어질 수 있고 즉, U 는 신뢰할 수 있는 주변 차량 N_U^t 목록에 V 를 추가 할 수 있음
- 각 차량 V 는 신뢰할 수 있는 주변 차량 목록 N_V^t 에 각 이웃 x 에 대한 바인딩 $(I_x, dig(C_x))$ 을 저장함
- 이 것은 가장 (impersonation) 공격을 막기 위한 것으로 V 가 U 로부터 속삭임을 받고 L_U 에 I_V 를 확인했다고 가정하면, 이 순간 바인딩 $(I_U, dig(C_U))$ 는 V 에서 만들어짐
- 바인딩이 만들어지면 K 는 U 의 개인 (private) 키가 없기 때문에 더 이상 U 로 가장 할 수 없음
- 반면에 K 는 바인딩 $(I_U, dig(C_U))$ 이 V 에서 만들어지기 전에 U 로부터 속삭임과 BSM이 들린다고 가정하면 이 경우 K 는 U 인 척하면서 V 에서 $(I_U, dig(C_U))$ 를

만들 수 있음

- 그러나 U 는 (아직) V 의 신뢰할 수 있는 주변 차량이 아니므로 속삭임 W_U 에는 I_V 가 없고, 따라서 K 는 V 의 한 홉 속삭임 주변 차량임을 증명할 수 없음
- BSM_K 가 V 에 도달하면 V 는 이 위조된 BSM 을 거부함
- 속삭임 범위 d_W 는 내용의 유효성 검사가 필요한 응용 프로그램에 따라 다름
- 응용 프로그램의 검사 범위가 더 넓어지는 경우, 범위를 확장하기 위해 속삭임의 송신 전력을 증가시킬 수 있다고 주장 할 수도 있지만 이는 채널 사용률도 함께 증가시킬 수 있음
- 이에 따라 더 적은 BSM 이 전송되고 차량 위치 추적 오류가 증가하도록 BSM 혼합 제어를 할 수 있고 이는 본질적으로 안전성에 영향을 줄 수 있음
- 이러한 부작용이 없는 2 홉의 속삭임 체크 범위를 확장하기 위해 W_V 가 U 에서 속삭임 검사를 통과하면, U 에 V 뿐만 아니라 L_V 에있는 BSM 을 신뢰하도록 할 수 있음
- U 는 2 홉 신뢰된 주변 차량을 식별 할 수 있음
- 단일 홉 검사에서 차량 V 는 도로에서 단일 속삭임 홉 d_W 밖에 있는 공격자 K 의 모든 BSM 을 필터링 할 수 있음
- 범위 확장은 이 속성을 변경하지 않으나 도로의 d_W 내에 위치한 공격자의 경우, 두 명의 속삭임 홉에 해당 차량을 신뢰할 수 있는 주변 차량으로 포함시켜 공격 범위를 두 배로 늘릴 수 있음
- 속삭임 홉 내에서 공격자에 대한 방어와 방어를 위해 제안된 속삭임 기법의 확장이 필요함

○ 공격 필터링 성능

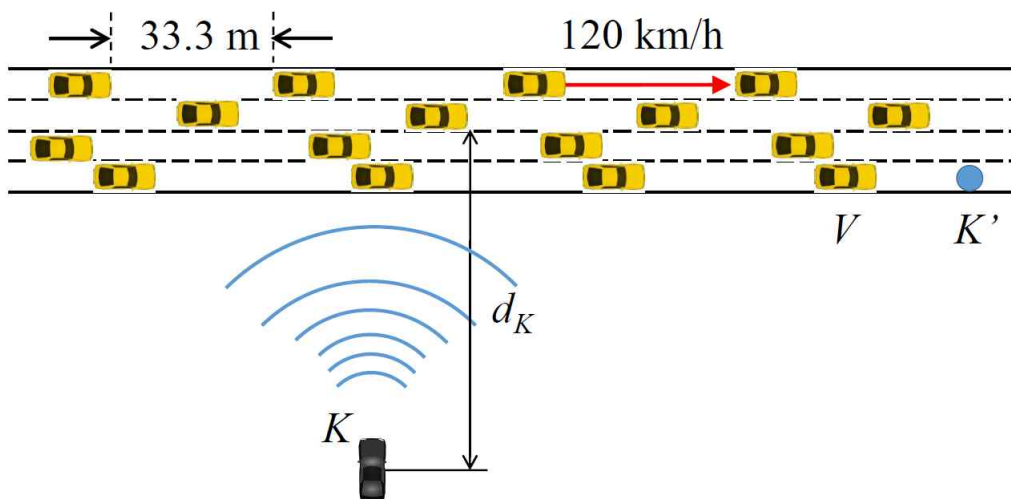


그림 90. 공격 시나리오

- 그림 90은 시뮬레이션에 사용된 공격 상황을 나타내는데 차량은 120 km/h의 속도로 4차선 고속도로를 움직임
- 같은 차선에 있는 차량 들 간의 차간 거리는 33.3m로 주어진 속도에서 1 초 동안 움직일 수 있는 거리임
- 속삭임 크기는 속삭임 ID (2 바이트), 인증서 (8 바이트)의 다이제스트 및 수신 된 속삭임 ID 목록 (최대 90×2 바이트)로 190 바이트보다 크지 않음
- 속삭임으로 인한 채널 이용률 증가를 최소화하기 위해 L_V 의 크기를 줄일 수 있지만 시뮬레이션에서는 최대 크기를 사용함
- BSM 크기는 메시지 (80 바이트)와 인증서 (125 바이트)를 합하여 205 바이트 임
- BSM이 10 Hz로 전송되고 7 Hz로 속삭임이 발생한다고 가정하며 BSM의 송신 전력은 23 dBm이며 속삭임의 송신 전력은 9 dBm임
- 경로 손실 모델 (path loss model)은 two-ray ground이고, 페이딩 모델은 $k=3$ 인 Rician임
- 주어진 상황에서 우리는 잘못된 위치 정보 (예. 위 그림 K'의 정보)로 V가 BSM_K 를 듣는 경우에 차량 V에서 공격이 성공적이라고 간주하고 BSM_K 는 V의 속삭임 테스트를 통과함
- 그런 다음, 시뮬레이션을 통해 공격자의 다양한 거리에서 성공적으로 공격당한 차량의 수를 도로 d_K 로 계산함
- 잘못된 위치 메시지의 승인으로 인해 발생할 수 있는 체인 충돌과 같은 파급 효과는 조사하지 않는데, 이는 자체적으로 주요 사업인 충돌 모델 (예. [61])에 대한 광범위한 조사가 필요하기 때문임
- 우리 연구의 주요 초점은 메시지 교환 단계 초기에 그러한 파급 효과의 가능성을 제거하는 데 저전력 탐지 장치의 사용을 시연하는 것임

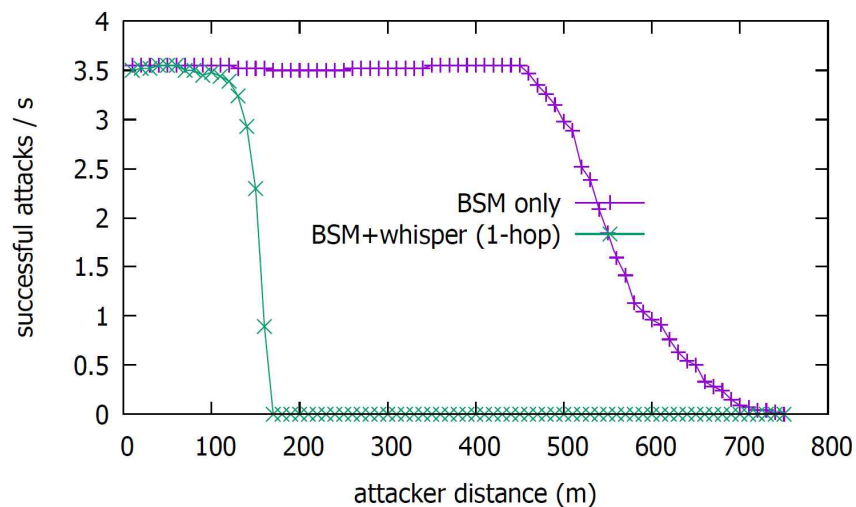


그림 91. BSM만 전송한 경우와 BSM과 속삭임을 같이 전송한 경우의 공격 성공

- 그림 91은 d_K 의 함수로 성공한 공격의 수를 보여주고 있음
- 즉, 도로 센터에서 얼마나 멀리 떨어져 공격자가 공격에 성공할 수 있는지를 나타냄
- 공격에 해당하는 차량의 수는 차량 교통 밀도, 차량 속도 및 공격 지속 시간의 함수이기는 하지만 d_K 의 효과에 중점을 둠
- 속삭임 체크가 없으면 공격자는 23 dBm의 BSM Tx 전력에서 $d_K > 600$ m 까지 공격을 성공적으로 수행 할 수 있음
- Tx power boosting이나 directional transmission으로, d_K 는 더 커질 수 있음
- 이 결과는 좋은 Line of Sight (LoS)를 통해 공격자가 고속도로에서 안전하게 자신을 찾을 수 있으며 이는 차량들에게 여전히 심각한 위협이 될 수 있음을 보여줌
- 공격 범위 내에서 공격에 노출된 차량의 수가 약 3.5 인 것은 차량 간 33.3 미터의 차간 거리가 있기 때문이며 차량 길이는 5 미터이므로 4 차선으로 약 3.5 차량이 매 초마다 공격 범위에 들어감
- 그러나 속삭임 검사를 통해 공격 가능 거리 d_K 는 d_W (약 170 m)로 크게 줄어들고, 이는 속삭임 검사가 공격 범위를 속삭임 범위 d_W 의 범위로 좁히는 데 효과적이라는 것을 확인시켜 줌
- 그래서 적어도, 속삭임 기법에 따라 거짓 위치 공격을 하기 위해서는 공격자가 길가에 가깝게 접근해야 함

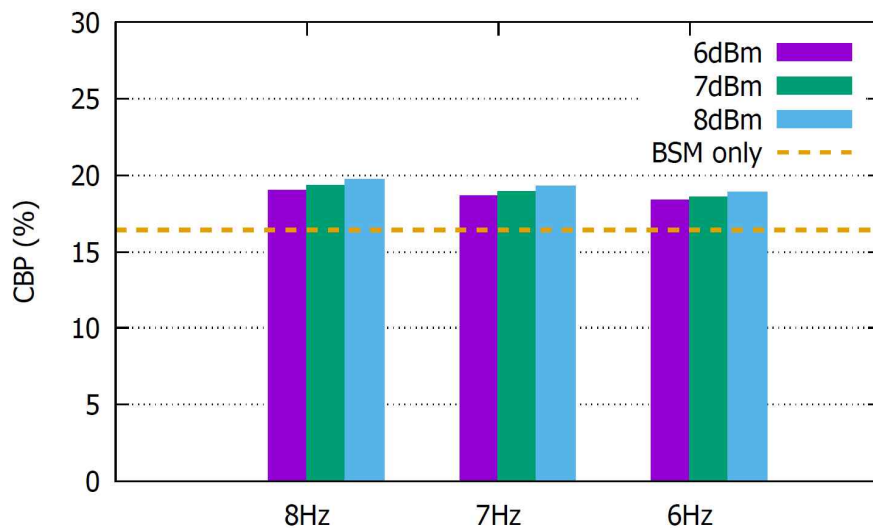


그림 92. 속삭임에 의한 CBP 증가

- 그림 92은 속삭임을 사용한 채널 사용률 (CBP)을 보여줌
- CBP의 증가가 Tx 전력과 빈도에 따라 2 %와 3 % 사이에 있음을 확인함
- 속삭임을 하는 속도가 BSM beacon 속도의 60 % ~ 80 % 일지라도 CBP의 증가

- 는 속삭임 메시지가 전송되는 전력이 적기 때문에 그다지 중요하지 않음
- 따라서, 저전력 식별자 교환 방식은 CBP를 약간만 증가시키므로 일반적인 beacon 교환을 과도하게 방해하지 않고도 수행 할 수 있음

○ 신용 기반 속삭임

- 지금까지 속삭임의 유용성을 확인했지만 길가에 충분히 근접한 공격자는 여전히 대상 차량의 속삭임을 듣고 공격 할 수 있음
- 따라서, 우리가 길가 공격자의 성공을 과소 평가할 수 있는 속삭임 기법 확장을 고안함
- 앞에서 논의된 2-홉 속삭임 기법을 가정함
- 공격자의 실제 위치와 메시지 수신 차량 사이의 거리 d_K 가 d_W 보다 작으면 공격자는 해당 범위의 차량을 공격 할 수 없으나 엿들은 WID를 악용하여 공격 범위를 확장할 수 있음
- 그림 93에서 공격자 K는 N_V^t 와 $d(A,K) \leq d_W$ 에 있는 WID 목록 L_A 에서 I_V 를 얻을 수 있음
- 이를 I_V 의 속삭임 W_K 로 우회하면 공격자는 공격 범위를 d_W 에서 $2*d_W$ 로 확장 할 수 있으며 V가 K를 통과 한 후에도 공격자와 희생자 사이에 다른 중간 차량 (예. B)이 있으면 비슷한 상황이 발생할 수 있음

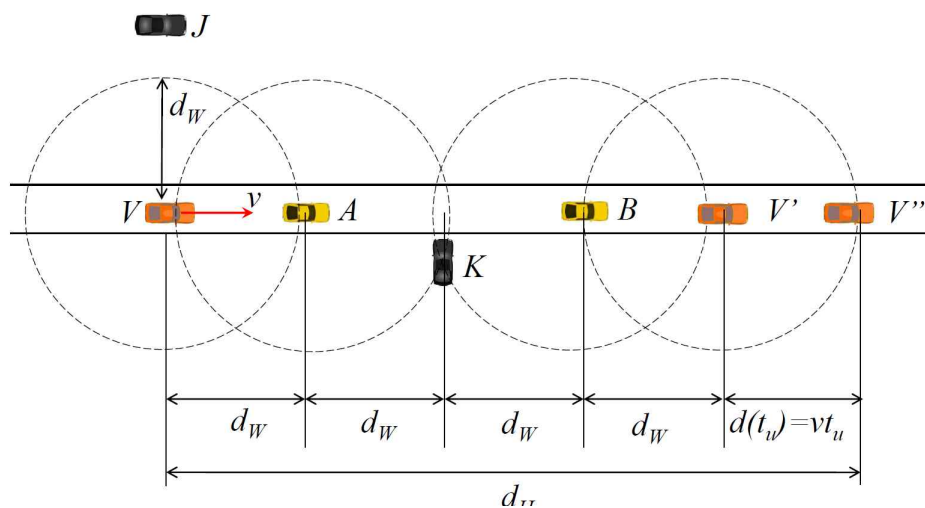


그림 93. 신용 기반 속삭임에서의 거리

- 또한, 공격자의 도달 범위를 $2*d_W$ 이상으로 확장할 수 있는 요소가 두 가지 더 있음
- 첫 번째는 WID 업데이트로 WID가 t_u 마다 변경되는 상황에서 차량 V가 다음 업데이트 순간 전에 속도 v 로 K로부터 이동하면 $2*d_W$ 이상 이동한 후에도 V가 동일한 I_V 를 계속 사용할 수 있기 때문에 $v*t_u$ 만큼 d_K 가 연장됨

- 공격자의 도달 범위를 확장하는 두 번째 요소는 연속 속삭임 간의 메시지 간격으로 V 가 $WID\ I_v$ 를 I'_v 로 업데이트한다고 가정하면 업데이트가 다음 속삭임에 반영되어 전송되기 때문에 이웃 U 는 이전 $WID\ I_v$ 가 포함된 BSM을 보낼 수 있음
- V 가 새로운 $WID\ I'_v$ 에 대한 속삭임 검사를 수행하면 U 로부터의 정상적 BSM이 필터링되기 때문에 새로운 WID 로 속삭이기 전에 각 차량은 이전 WID 를 가진 BSM을 받아 들여야 함
- 우리 연구에서는 BSM 및 속삭임 전송 빈도를 고정하지만 이는 혼잡 제어의 대상이 되어 최악의 채널 혼잡도에서 BSM 전송 빈도는 1.6 Hz로 떨어질 수 있음
- 마찬가지로, 우리는 속삭임이 비슷하게 제어되고 최악의 경우도 c Hz라고 가정하고 이전 WID 를 사용하는 주변 차량 BSM은 업데이트 후 $1/c$ 초만큼 늦게 도착할 수 있음
- 이 정보는 공격자가 엿들을 수 있는 범위 계산에 반영되고, 공격자는 다음과 같은 거리에서 차량을 속이는 시도를 할 수 있음

$$d_X \leq 4 \cdot d_W + v \cdot (t_u + 1/c)$$

- 여기서 d_X 는 공격자가 V 의 WID 를 이용할 수 있는 최대 거리이고 공격자가 공격을 시작할 수 있는 곳에서 확장된 공격 범위가 아님
- 공격자는 실제로 도로의 d_W 이내에 물리적으로 위치하여 d_W 이내에 차량에 영향을 줄 수 있음
- 도로의 외부 d_W 로부터의 공격 패킷은 속삭임 검사에 의해 필터링 됨
- 예를 들어, 위 그림에서 속삭임 범위를 벗어난 공격자 J 는 V 또는 다른 멀리 떨어진 차량에 대한 공격을 탑재 할 수 없는데, 이는 본질적으로 공격의 실제 창을 d_W 까지 좁히는 속삭임 계획의 바람직한 특성은 손상되지 않기 때문임
- 마지막으로, 공격자는 속삭임의 송신 전력을 늘려 도달 범위를 확장하려고 시도 할 수 있지만, 공간 제한을 생략한 무선 제한 사항을 검사하여 공격자를 탐지 할 수 있음
- 공격자 $K \in N_V^t$ 에 대처하기 위해 우리는 신용의 개념을 통합하여 확장하는 속삭임 기법에서, 각 차량 V 는 각 인접 차량 U 에 대해 credit $C_V(U)$ 를 추적함
- 단순히 각각의 속삭임 테스트를 통과할 때마다 점수를 1 점씩 올리고 매 초마다 1 점씩 점수를 내리게 함
- 공격자가 임의로 credit을 부풀리는 것을 방지하기 위해 각 주변 차량에 대한 증가는 속삭이는 빈도 f_W 로 제한되므로 f_W 를 초과하는 속삭임의 수신은

credit에 추가되지 않음

- 최소 속삭임을 1 Hz 미만으로 떨어뜨릴 수 없다고 가정하면 d_w 에서 V 사이의 정상적인 주변 차량은 V 로 0이 아닌 credit을 유지함
- $f_w = 7$ Hz의 속삭임 주파수가 주어지면 한 주변 차량이 초당 누적 할 수 있는 최대 크레딧은 $7-1=6$ 이며, 이 관찰에 기초하여 주어진 이웃 차량을 V 로 신뢰 할 수 있는 신용 임계값을 다음과 같이 설정할 수 있음

$$\theta_V = (f_w - 1) \cdot d_X / v(V)$$

- 여기서 $v(\cdot)$ 는 주어진 차량의 속도입이고 임계값은 근본적으로 길가 공격자가 d_X 에서 속도 v 로 이동하거나 $d_X/v(V)$ 초 동안 동등하게 V 에 최대로 누적할 수 있는 credit임
- 주변 차량이 호스트 차량과 함께 credit을 가지기 위해 얼마나 오랫동안 여행해야 하는지를 보여주기 위해 다음과 같이 $d_X/v(V)$ 를 t_u 및 v 에 대한 함수로 그려주며 $d_w = 170$ m로 가정함

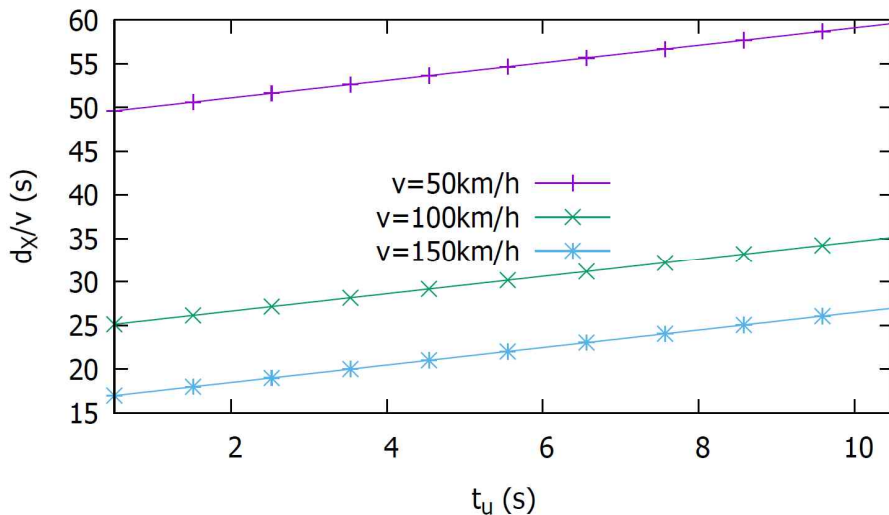


그림 94. 신뢰하기 위해 필요한 시간과 공격자를 위해 허용된 속삭임 시간 비교

- 분명히 나쁜 채널 상태로 인한 메시지 손실로 인해 신용이 임계값에 미치지 못하는 정상적인 차량을 완전히 무시할 위험이 있고 새 차량이 교차점에서 합류 할 수 있음
- 그러나 그림 94에서 d_w 를 속삭임 수신 확률이 0이 아닌 최대 거리로 정의한다는 것을 고려하면 매우 보수적인 추정이며 게다가 5 분 동안 사용할 수 있는 BSM의 temporaryID와는 달리, 속삭임 ID는 인증서 다이제스트와 바인딩이 유지되는 한 훨씬 빠르게 변할 수 있음

- 작은 t_u 를 사용하여 임계값을 줄이면 속삭임 범위 d_w 내의 차량이 서로의 임계값을 빠르게 초과하는 것을 도울 수 있음
- 작은 d_w 를 사용하면 임계값을 훨씬 더 줄일 수 있는데, 특히 속도 v 가 작을 때, 더 작은 전송 전력을 사용하여 d_w 를 줄이는 것이 유용할 수 있음
- 왜냐하면 v 가 작으면 이동하는 거리가 상대적으로 짧아지기 때문에 신뢰도 검사가 더 가까운 주변 차량에 집중될 수 있기 때문임
- 마지막으로 싱글 홉 (single-hop) 속삭임 검사가 임계값의 대략 절반을 차지하므로 현실적으로는 주변 차량이 신뢰할 수 있는 호스트 차량의 통신 범위에 있어야 하는 시간이 짧을 수 있음
- Credit 기반 속삭임 기법의 성능을 조사하기 위해, 동일한 parameter 세트를 사용하여 앞부분과 동일한 시뮬레이션을 반복함
- 유일한 차이점은 credit 기반 검사를 한 것이고 그림 95과 같은 결과를 보여줌

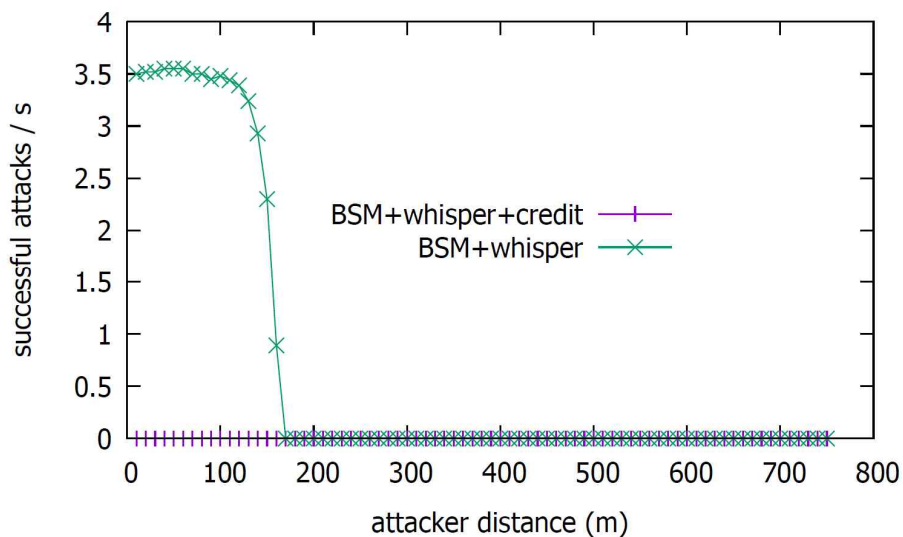


그림 95. 추가적인 credit 기반 검사로 인한 공격 성공 확률

○ 군집 주행에의 적용

- 길가의 공격자로부터 위조된 내용으로 차량간 통신 (V2V) 메시지를 수신하는 군집 주행 차량은 갑자기 멈추거나 천천히 이동함으로써 군집 주행으로 얻을 수 있는 교통 효율을 희생시킴
- 이 문제를 완화하기 위해 저전력 beaconing을 사용하고 주어진 비콘이 원격 공격자가 아닌 근접 거리에서 오는지 확인함
- 이 검사는 길가에서 위조된 메시지 공격에 대비하여 군집 주행의 효율성을 보호하는 데 도움이 될 수 있음을 입증함
- 도로 운송의 연료 및 교통 효율을 향상 시키는 방법으로 트럭 군집 주행은 광

범위하게 연구되고 테스트 되었음

- 예를 들어 California PATH [62] 프로그램은 자동화 된 중 방향 제어를 사용하여 3 개의 대형 트럭으로 실험을 수행함
- Energy ITS [63]는 세 대의 자동 대형 트럭과 차량 간격이 매우 작은 경트럭으로 테스트를 수행하였음
- 현재 더 높은 효율 목표를 찾고 있는 수많은 사람들이 있으며 이러한 노력 [64]은 군집 주행이 실제로 연료 및 도로 교통 효율을 향상 시킬 뿐만 아니라 차량 간 (V2V) 통신이 필수적 [65]이라는 것을 발견하였음
- 즉, V2V 통신은 군집 주행 시 최신 정보 공유 [66]를 통해 주행 안정성 (string stability)을 확보하는 데 도움이 되므로 군집 주행 차량의 효과적인 제어를 도움
- 그러나 우리가 우려하는 것은 V2V 통신이 군집 주행을 용이하게 할 뿐만 아니라 공격자에게 공격 기회를 제공한다는 것임
- 예를 들어, 해커는 "유령 차량"의 위치 메시지를 위조하여 긴 군집에서 많은 유령 차량을 만들거나 군집 주행 차량의 속도를 느리게 할 수 있음
- IEEE 1609.2 표준은 발신자 인증, 메시지 무결성 및 기밀성과 같은 V2V 통신의 보안 측면을 다루지만 메시지 내용 유효성 문제를 아직 다루지 않음
- V2V 통신을 군집 주행 (platooning)에 적용할 때의 위치 확률 점검 문제를 해결함
- 특히, 길가 공격 시나리오는 구현 및 실행 하기가 용이하여 가장 심각한 보안 위협으로 간주됨
- 군집 주행 차량이 자신이 수신하는 BSM의 출처가 근접한 차량인지 아니면 도로 옆에 있는 원격 공격자인지 판단하기 위해 저전력 beaconing 메시지 (소위 '속삭임'이라고도 함) [67]를 사용하는 솔루션을 제안함
- 위조된 메시지가 군집 주행 (platooning)의 교통 효율에 끼치는 바람직하지 못한 영향을 완화 할 수 있음
- 저전력 탐지 장치 (이하 '속삭임')가 위치 확인을 가능하게 하는 방법은 적절한 보안 자격 증명을 첨부하는 것을 제외하고는 간단함
- 일반적으로 수 백 미터를 여행하는 Basic Safety Message (BSM)와 달리 속삭임의 송신 (Tx) 전력은 송신기 부근의 차량에만 도달하도록 훨씬 낮게 설정됨
- 또한, 각 차량은 속삭임 ID (WID)를 포함하여 주변 차량에 속삭이고, 주기적으로 WID를 변경함
- 따라서 미지의 차량 U에 속삭임 전송의 군집 주행 V의 WID가 포함되어 있으면 V는 U의 속삭임을 듣고 그 주변에 충분히 가까이 있다는 것을 알게 됨
- 그러면 V는 U의 BSM 위치 정보를 신뢰하게 됨 (신뢰 관계는 이웃 사람들이 장기간에 걸친 검사를 통과함에 따라 더욱 견고해질 수 있음)

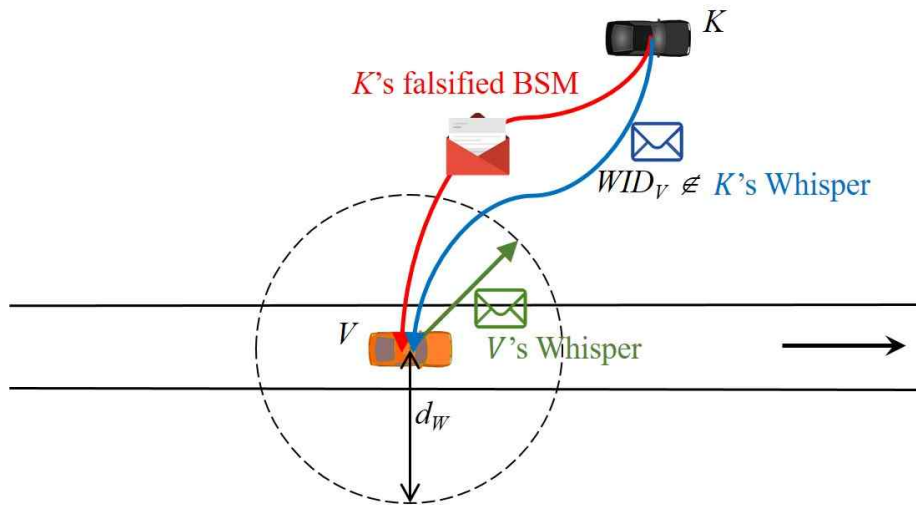


그림 96. 저전력 beacon (속삭임)을 통한 위치 확인

- 반면에, 그림 96에서 길가의 공격자 K는 저전력 beaconing 거리 d_w 보다 더 멀리 떨어져 있음
- K는 V의 속삭임을 받을 수 없으므로 V의 WID를 K의 속삭임에 넣을 수 없음
- V는 K의 속삭임에 WID가 없다는 것을 검사하기 때문에 위조 데이터를 포함하고 있는 K의 위조된 BSM을 필터링 할 수 있으며 이 절차를 '속삭임 검사'라고 부를 것임
- 이 속삭임 검사를 통해 원하는 것은 필터링되는 $d > d_w$ 의 모든 BSM이 아니고, 오히려 이 메커니즘이 V2X 응용 프로그램에 제공되어 주변 차량으로부터 수신한 BSM의 신뢰 수준을 결정하도록 하는 것임
- 따라서 d_w 는 Tx 전원 설정을 응용의 안전 요구 사항에 따라 설정해야 함
- 예를 들어, 군집 주행에서 선행 차량과의 충돌을 방지하기 위해 최대 감속 시 제동 거리의 함수가 될 수 있음 [68]
- 길가의 공격자는 위조된 위치 정보와 함께 BSM을 전송하여 군집 주행 차량의 가장 앞에 정지한 차량이나 보행자가 있다고 생각하도록 군집 주행 차량을 기만 할 수 있음
- 신뢰 수준 평가가 없으면 군집 주행 차량이 위조된 메시지 내용을 신뢰하고 사고를 예방하기 위해 속도를 늦출 수 있음
- 속삭임 검사를 사용하면 군집 주행은 위조된 메시지 내용이 잘못되었다고 판단 할 수 있음
- 속삭임 검사 여부에 상관없이 군집 주行的 교통 효율을 평가하기 위해 차량 및 비 군집 주행 차량이 도로에서 함께 움직이는 시뮬레이션 시나리오를 구성하고 그림 97과 같이 도로 측 공격자에게 공격을 받음

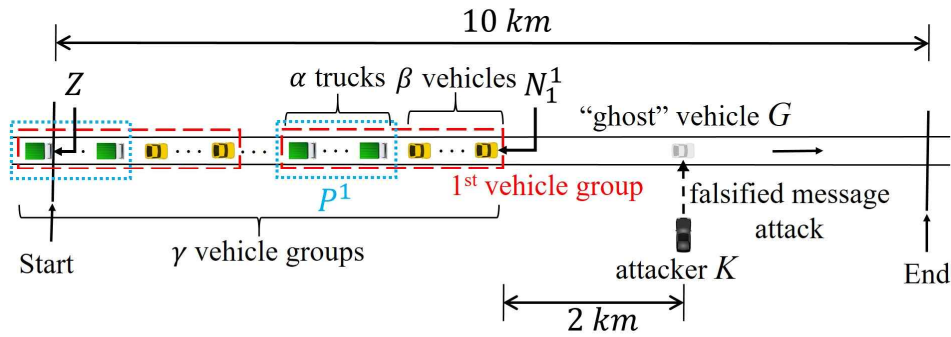


그림 97. 시뮬레이션 시나리오

- 우리는 차량 그룹이 함께 여행하는 $\alpha + \beta$ 차량으로 구성되어 있다고 가정함 (α : 군집 주행 차량, β : 비군집 주행 차량)
- N_j^i 는 j 번째 차량 그룹의 i 번째 비군집 주행 차량을 의미하며, 군집 주행의 운행 안정성 (string stability)을 위해 시뮬레이터에 소집된 각 차량의 원하는 가속도를 계산하는 Rajamani 컨트롤러 [69]를 모델링하여 사용함
- 군집 주행 차량이 선행 차량과 군집 주행 리더의 움직임 데이터를 사용하는 반면 비 군집 주행 차량은 선행 차량의 운동 데이터만 사용한다고 가정하고, 군집 주행 차량은 그 이동 데이터를 다음 차량에 전달함
- 군집 주행 안전 간격 (d_p)을 10 m로 설정하였고, 군집 주행 트럭의 길이가 15m라고 가정함
- 비 군집 주행 차량의 길이는 5 m이며, 비 군집 주행 차량간의 간격은 80 km/h에서 1 초동안 이동할 수 있는 거리임
- 모든 차량은 군집 주행 차량의 속도인 80 km/h로 속도를 유지하려고 시도함
- 대조적으로, 비 군집 주행 차량은 d_p 를 복구하는 경우 더 빠른 속도를 사용할 수 있음
- 최대 가속 및 감속은 각각 3 m/s^2 및 -5 m/s^2 이며 [70], 모든 차량은 그들의 센서를 사용하여 LoS 150m 이내의 장애물을 감지 할 수 있음
- N_1^1 는 앞쪽의 장애물을 쉽게 인식 할 수 있지만 다른 차량은 선행 차량에 의하 장애물을 감지가 어렵게 됨
- 공격자 K는 길가의 d_w 에 있으며 K는 N_1^1 의 이동 시작 지점으로부터 2km 떨어진 곳에 실제로 존재하지 않는 유령 차량이 있다는 위조된 메시지를 전송하여 다른 차량의 급제동을 일으키려 함
- 마지막 차량 Z가 10 km의 도로를 달리는 데 걸리는 시간을 α , β , 및 γ 를 변화시키면서 측정함 ($5 \leq \alpha \leq 10$, $1 \leq \beta$, $\gamma \leq 10$)
- 전면의 차량이 위조된 메시지 공격의 영향을 받는 경우에는 누적 지연 효과가 나타남

- 특히, 속삭임 검사 없이 각 차량은 G가 위조된 좌표에 실제로 있다고 믿고 만일 충돌할 위험이 있다고 판단하면 브레이크를 작동시킴
- 이를 위해, 각 차량은 선행 차량과의 충돌 시간 (Time To Collision, TTC)이 2.6 초일 때 최대 감속도의 30 %에서 브레이크가 걸리는 것으로 가정하고, 충돌을 방지하기 위해 TTC가 1 초인 최대 감속도에서 브레이크가 걸리는 것으로 가정함
- 각 차량은 센서가 G가 실제로 나타나지 않는 것을 감지 할 때까지 브레이크를 작동시킴

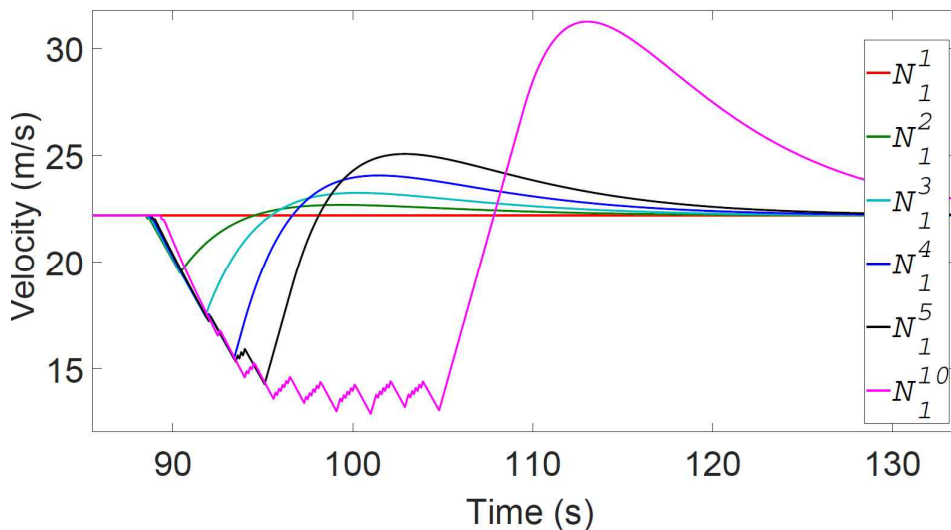


그림 98. 위조 메시지 필터링이 없는 경우 비 군집 주행 차량의 속도 변화

- 그림 98은 위조된 메시지 공격에 의해 $\alpha = \beta = 10$ 의 상황인 첫 번째 차량 그룹의 비 군집 주행 차량의 움직임을 보여줌
- N_1^1 은 유효 차량 (G)에 대한 LoS를 가지고 있기 때문에 센서를 사용하여 K의 메시지가 위조된 메시지임을 인지하고 감속하지 않고 이전과 동일한 속도로 계속할 수 있음
- 그러나 그룹의 다른 차량들은 천천히 감속함
- N_1^2 는 G까지의 TTC가 2.6 초에 도달하면 최대 감속도의 30 %로 감속을 시작함
- 하지만 곧 G가 존재하지 않음을 확인할 수 있으므로 선행 차량과 안전 거리까지 가속함
- 후속 차량의 속도는 전방 차량의 속도보다 더 감소하며 이 효과는 마지막 비 군집 주행 차량 N_1^{10} 까지 전파됨
- N_1^{10} 의 속도 변화로부터 가속과 감속이 약 60 회 발생하여 탑승자에게 불편을 초래할 수 있음을 관찰함
- 결과적으로, N_1^{10} 바로 뒤에 오는 P^1 의 리더는 공격으로 인해 속도가 느려지고

- 센서가 G의 부재를 확인한 후에만 다시 속도를 증가시킴
- P^1 에 의해 통제되는 군집 주행 차량들은 리더와 같은 속도로 이동하므로 80 km/h 이상으로 이동할 수 없음

○ 연구 결과

- 우리 연구에서는 위조된 위치 정보를 유포하는 원격 공격을 걸러 낼 수 있는 WAVE 기반의 기법을 연구함
- 저전력 beacon을 추가로 사용함으로써, 차량은 실제로 BSM이 물리적으로 가까운 주변 차량으로부터 오는 위치 정보인지 여부를 상호 점검 할 수 있음
- 원격 공격자가 임의로 자신의 위치를 주장하는 것을 방지하며 공격자는 적어도 도로의 저전력 전송 범위 내에 있어야 공격을 할 수 있음
- 이 경우에도 전달된 BSM마다 누적된 credit을 포함하는 기법을 도입함으로써 이러한 위조된 공격 메시지를 더 많이 방어 할 수 있음
- 그러나 공격 당시 충분한 신용을 축적하지 못한 정상적인 차량으로부터의 메시지를 인정하기 위해서는 더 많은 연구가 필요함
- 앞으로의 또 다른 작업은 모바일 공격자를 위해 제안된 작업을 확장하는 것임
- 마지막으로 BSM 혼잡 제어가 적용될 때 속삭임이 어떻게 제어되어야 하는지에 대한 연구도 필요함
- 실제 적용해 봄으로, 차량 통신을 사용하는 상황에서 길가 공격자의 위협으로 인해 군집 주행의 교통 효율이 저하 될 수 있음을 확인함
- 위조된 메시지 공격에 대처하기 위해 저전력 beaconing 메시지를 적용 할 때 군집 주행은 길가 공격에 관계없이 교통 효율을 유지할 수 있음

(차) 차량 통신에서 전송 각도 검사를 통한 거짓 위치 공격 탐지 연구

○ 요약

- 차량 통신에서 데이터의 타당성은 아직 해결되지 않은 보안 문제임
- 특히 공격자는 수신 차량으로부터 안전하지 않은 응답을 유발하기 위해 Basic Safety Message (BSM)의 잘못된 위치 값을 위조 하여 보낼 수 있음
- 데이터의 타당성은 센서 융합, 행동 분석 및 통신 제약에 기반한 다양한 접근법으로 제안되었지만, 이들 중 어느 것도 이 문제를 완전히 해결하지 못하였음
- 우리 연구에서는 길가 공격자와 같은 단조 위치션을 무효화하기 위하여 Angle of Arrival (AoA) 기반 방법을 제안함
- 해당 방법은 WAVE 프레임 워크 전체에 구축되어 기존의 센서 융합 기반 또는 동작 기반 검사를 적용 할 수 없는 경우에도 사용할 수 있음
- 제안된 방법은 성능을 위해 강력히 권장되는 추가 안테나 이상을 필요로 하지 않는 완전히 수동적인 방식임

○ 개요

- IEEE의 차량 환경에서의 무선 접속 (WAVE; Wireless Access in Vehicular Environment) 시스템에서 각 차량의 위치, 속도 및 방향을 보고하는 주기적인 beacon (비콘) 또는 Basic Safety Message (BSM)[4]는 협력 주변 인지 (cooperative neighborhood awareness)을 하는 데 중요함
- 협력 주변 인지는 Cooperative Collision Warning (CCW)와 같은 운전 안전 응용을 가능하게 함
- 따라서 주행 안전을 향상시키기 위해서는 BSM 메시지의 안정적이고 효율적인 전달이 필수적임
- IEEE WAVE 표준은 BSM 메시지의 주기를 지정하지 않지만, 대다수 문헌 및 연구에서 일반적인 메시지 주기는 1Hz [71]에서 10Hz [72],[73]임
- 차량용 통신을 위한 WAVE 프레임 워크는 IEEE 1609 [47, ?, 48], IEEE 802.11 [49], SAE J2735 [4]의 세 가지 표준을 기반으로 함
 - ☞ IEEE 1609.2 [47]는 송신자 인증 (authentication), 무결성 (integrity) 및 기밀성 (confidentiality)을 다루는 프레임 워크의 보안 측면을 담당함
 - ☞ IEEE 1609.4 [48]는 개인 정보 보호를 위한 MAC 주소 가명을 제안함
- 아직 해결되지 않은 중요한 문제 중 하나는 메시지의 타당성 (plausibility)임
- 우리 연구에서는 수신자가 수신된 메시지 내용을 신뢰할 것인지에 관한 여부

를 확인하는 방법을 연구함. 이는 IEEE 1609.2에 의해 다루어지는 송신자 인증과는 다른 방식임

- ☞ 보낸 사람이 유효한 자격 증명을 가지고 있다 해도 반드시 메시지 내용을 신뢰할 수 있다고 보장할 수는 없음
- 메시지에 타당하지 않은 내용이 들어있는 데에는 두 가지 이유가 존재함
 - ☞ 첫 번째는 감지 오류 또는 장치 오작동으로, 예를 들어 GNSS (Global Navigation Satellite System) 오류로 인해 메시지 보낸 사람이 잘못된 좌표를 제공 할 수 있음
 - ☞ 두 번째는 공격자가 의도적으로 전송된 메시지에 잘못된 값을 넣는 악성 공격임
 - ☞ 예를 들어, 차량들이 서로의 의도를 공유하기 위해 협력 자율 주행에 V2V 정보를 적용할 때, 차량은 다른 차량을 제어하기 위해 V2V 정보와 경고를 직접 활용할 수 있음. 이 경우 공격자는 의도적으로 수신기 차량이 오류 메시지 내용에 반응하도록 할 수 있으며 충돌과 같은 바람직하지 않은 결과를 초래할 수 있음
- 메시지 타당성 검증의 문제점은 오랫동안 지속되었음
- V2V 통신 기술의 시작으로부터, 데이터 생성은 안전에 커다란 영향을 미치는 것으로 나타남 [50],[51]
- 또한, 구현 및 실행 용이성 때문에 위조 데이터는 가장 심각한 보안 위협으로 간주됨 [51]
 - ☞ 예를 들어, 공격자는 실제로는 존재하지 않는 ‘유령 차량 (ghost vehicle)’의 잘못된 위치 메시지를 조작하여 긴 차량 군집에서 군집의 파괴를 일으킬 수 있음 [52]
- 이 문제에 대한 접근법은 센서 융합 [54],[55] 행동 분석 [53],[56] 그리고 통신 기반 제약 검사 [52]에 기반한 세 가지 방법이 존재함
- 우리 연구에서는 세 번째 범주에 속하는 Angle of Arrival (AoA) 기반 방법을 제안함
- 길가의 공격자와 같은 적에게서 위조된 위치를 무효화하기 위해 무선 통신의 물리적 제약을 이용함
- AoA 기반 방법을 사용하여 위조된 위치를 식별할 때, 수신 차량은 위조된 위치를 포함하는 메시지를 무시하고 폐기할 수 있음
- 제안된 접근 방식은 성능에 제약이 생겨 추가 안테나가 필요하지 않은 완전히 수동적인 방식임
- 우리 연구의 내용은 프로토콜을 변경하거나 채널을 사용할 필요가 없기 때문에 WAVE 프레임 워크에서 완전히 구현될 수 있음
- 다른 두 가지 접근법을 조합하여 사용하는 것을 배제하지 않지만, 다른 두 가

지 접근법에 비하여 확실한 장점이 있음

- ☞ 센서 기반 위치 확인이 작동하지 않는 Non-Line-of-Sight (NLoS) 상태에도 작동 할 수 있음. 이는 카메라, 레이더 및 라이다와 같은 대부분의 차량 센서가 Line-of-Sight (LoS) 장치이기 때문임
- ☞ 행동 분석이 실패하더라도 해결할 수 있음. 하나의 행동 분석은 움직이는 행동을 나타내지 않기 때문에 정지된 차량에는 적용할 수 없음
- 우리 연구는 또한 개별적인 또는 협동적인 방법으로 최대 거리 확인에 의존하는 기존의 통신 제약 기반 방식에서 탈피할 수 있음
 - ☞ 통신 거리는 운전 중에 끊임없이 변화하는 많은 환경 요인에 따라 달라지기 때문에 불완전하게 정의된 변수임. 예를 들어 차량의 교통량이 많고 거리의 여러 장치와 높은 건물이 모두 거리에 영향을 줄 수 있음
 - ☞ 더욱이 SAE J2945에 정의된 혼잡 제어 알고리즘은 비컨의 송신 전력을 조절하기 때문에 불가피하게 메시지 전파 거리가 변화함
- AoA 기반의 방법은 이러한 문제에 덜 영향을 받음

○ 비컨 도착의 각도 확인 방법

- WAVE On-Board Unit (OBU)는 둘 이상의 안테나를 가질 수 있으며 다중 안테나를 사용하면 신호의 공간적 다양성이 증가하여 수신 성능이 향상됨
- 이러한 이유로 SAE J2945 표준은 두 개 이상의 안테나를 사용할 것을 강력히 권장함
- 따라서, 우리 연구에서는 OBU가 두 개의 안테나를 통해 신호를 수신하고 AoA 측정을 위해 적어도 두 개의 신호를 얻을 수 있다고 가정함
- 고해상도 AoA 측정을 위한 2 개의 가장 잘 알려진 알고리즘이 있음
 - ☞ 그것들은 Multiple Signal Classifier (MUSIC) [74]와 Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Technique (ESPRIT) [75]을 통한 신호 매개 변수의 추정임
 - ☞ 이것들은 여러 소스의 AoAs를 찾을 수 있으며 beamforming (빔 포밍), maximum entropy (엔트로피) 와 maximum likelihood와 같은 다른 알고리즘에 비해 높은 공간 분해 성능을 가짐
 - ☞ 안테나의 성능이 좋고 그 수가 적은 경우, 계산 비용이 문제가 되지 않는다면 MUSIC 알고리즘이 적합함
 - ☞ 검출할 소스의 수와 비교하여 안테나가 충분하고 계산 능력이 제한적이라면 ESPRIT 알고리즘이 적합함
- AoA 측정을 위한 안테나의 수가 적고 OBU는 MUSIC 알고리즘을 수행할 수 있는 충분한 계산 성능을 가지고 있기에, 두 가지 중에서 MUSIC 알고리즘을 사용하였음
- MUSIC 알고리즘은 AoA를 측정하는 잘 알려진 알고리즘 중 하나임

- 수신 신호를 이용하여 얻은 covariance (공분산) 행렬의 characteristic decomposition (특성 분해)를 수행하여 신호를 구성하는 잡음 부분 공간에 직교하는 신호 부분 공간을 생성함
- 2 개의 직교 부분 공간을 사용하여 스펙트럼 함수를 구성하고 스펙트럼 고점을 검색하여 AoA 신호를 검출함
- WAVE 시스템은 IEEE 802.11a의 변형인 IEEE 802.11p를 사용하여 통신하며 IEEE 802.11a와 같이 Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) 변조를 사용함
- 802.11p OFDM 프레임 앞에는 Physical Layer Convergence Procedure (PLCP) preamble이 선행됨

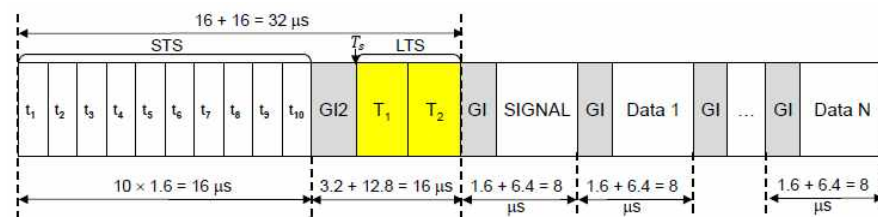


그림 99. 10 MHz 채널에서 PLCP preamble

- 그림 99과 같이 OFDM 프레임은 프레임 시작 검출을 위하여 10 개의 Short Training Symbols (STS)와 채널 추정을 위한 2 개의 Long Training Symbols (LTS)로 구성됨
- STS 뒤에 등장하는 12.8 μ s [76] 길이의 정의된 심볼인 LTS의 연속적인 전송을 기반으로 채널 H를 추정함
- 우리 연구에서는 LTS를 사용하여 AoA를 측정함
 - ☞ OBU 상의 두 안테나의 기준 안테나 (안테나 #1)를 통해 수신된 신호를 사용하여 preamble을 검출하고 LTS의 시작 시간 T_s 를 얻음
 - ☞ T_s 를 시작으로 안테나로부터 수신된 LTS T1 및 T2를 이용하여, T1과 T2로 구성된 128 개의 샘플의 중간 64 샘플에 대해 MUSIC 알고리즘을 사용하여 AoA를 계산함

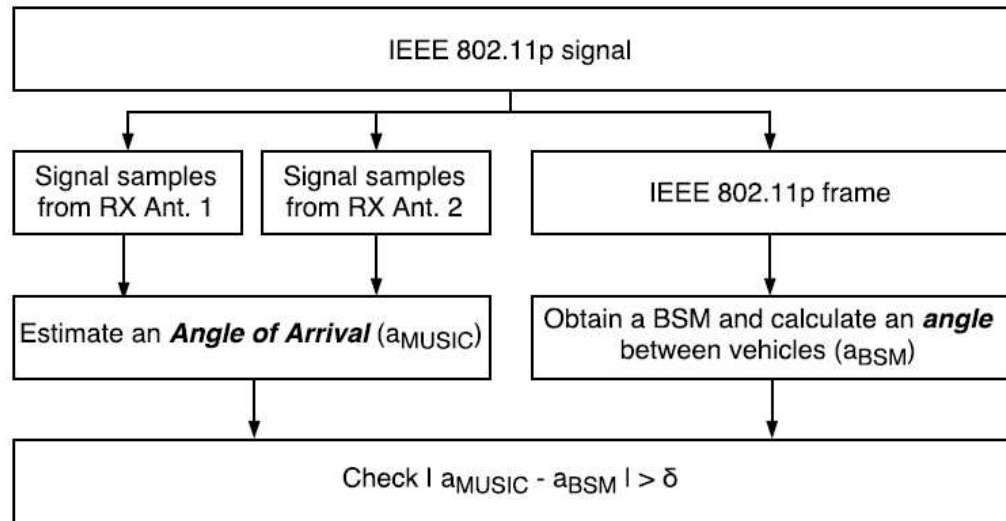


그림 100. Quick angular check system의 작업 흐름도

- 그림 100는 quick angular check system (신속 각도 검사 시스템)의 작업 흐름도임
- IEEE 802.11p 신호가 두 개의 안테나에 의해 수신될 때, MUSIC 알고리즘의 입력 값인 LTS를 획득함. 이를 통해 MUSIC 알고리즘은 AoA a_{MUSIC} 를 계산함
- 수신기는 BSM 속 발신자의 GPS 정보와 수신자의 로컬 GPS 정보를 비교하여 각도 a_{BSM} 을 계산함
- 우리는 a_{MUSIC} 와 a_{BSM} 사이의 차이를 기준 신뢰 각 (δ)과 비교함으로써 메시지가 위조되었는지 여부를 결정함. 즉, $|a_{MUSIC} - a_{BSM}| > \delta$ 일 때, 수신된 BSM은 위조된 메시지로 간주됨

○ 선행 검증

- AoA 측정의 정확성과 실제 차량 환경에서의 적합성을 확인하기 위하여 앞서 언급 한 MUSIC 알고리즘에 IEEE 802.11p 프레임의 LTS를 적용할 때 실험을 수행함
- 실내 AoA 측정 실험을 통해 운전의 가능성을 확인하고 실외 차량 실험을 통해 실제 사용 적합성을 확인하였음
- 실험용 테스트 베드는 OBU, 상용 WAVE 장치 및 Software Defined Radio (SDR) 장비 인 Universal Software Radio Peripheral (USRP) B210으로 구성됨



그림 101. USRP B210와 OBU로 구성된 테스트 베드

- 테스트 베드에서 차량의 USRP B210은 신호를 수신하는 OBU 역할을 하고 길가의 OBU는 악의적인 공격자의 역할을 함
- 실험을 위해 100 byte BSM이 WAVE의 공공 안전 서비스 채널인 #172 채널 (5.86 GHz)로 전송됨
- Multipath (다중 경로) 효과를 제거하기 위해 실내 테스트에서 송신 전력을 0dBm으로 설정함. 실내 테스트는 실외 테스트를 위한 타당성 검사 역할을 함
- 전원 공급 장치 및 신호 처리를 위해 Linux 노트북을 사용하였음
- OBU와 USRP B210은 모두 5.9GHz 대역에서 작동하는 4.5dBi dipole (다이폴) 안테나를 사용하였음
- USRP B210에 장착된 안테나 사이의 거리는 2.5cm이며 이는 5.86GHz 반송파 ($\lambda/2 \approx 2.56\text{cm}$)의 파장의 약 절반임

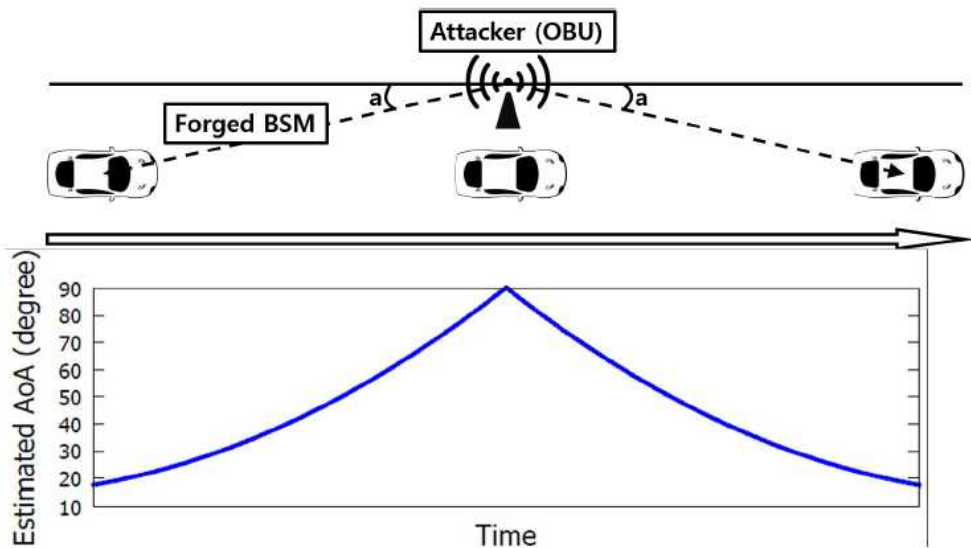


그림 102. 도로를 지나가는 차량에서의 AoA ground truth 추정값

- 그림 102처럼 고정된 위치의 공격자가 BSM에 위조된 위치 정보를 통과 차량으로 전송하고, 통과 차량이 BSM을 수신하는 시나리오에서 실험을 수행함
- AoA의 ground truth는 지나가는 차량이 공격자와 가장 가까울 때인 90도까지 가능함
- 위의 ground truth 그래프의 기울기는 측정 각이 차량 속도에 따라 빠르게 혹은 느리게 변하기 때문에 다양 할 수 있지만, 전반적인 추세는 위와 같음 (그림 102)
- BSM을 수신하고 AoA를 결정하는 로직을 구현하기 위해 Dedicated Short Range Communication (DSRC) 대역에 맞춘 USRP를 사용함
- WAVE 통신을 지원하는 상용 장치에서는 중간 계층을 조작하지 못하기 때문에 물리 계층 신호의 수집과 처리가 가능한 SDR에 프로토타입을 구현하였음
- 실험에 사용한 하드웨어는 USRP B210으로, 70MHz ~ 6GHz 대역 신호를 수신할 수 있으며 두 개의 동기화 된 채널로 동시에 두 안테나에서 신호를 수신할 수 있음
- 또한 오픈 소스 라이브러리인 GNU Radio v3.7.9 및 gr-ieee802-11 extension [77] 소프트웨어를 사용하여 신호를 수집하고 OBU에서 전송된 BSM 프레임을 탐지하였음

○ 실험 검증



그림 103. 실내 실험에서 사영된 OBU (좌하단)와 USRP B210 (우상단)

- 실내 정적 실험 : 위의 그림과 같이 OBU와 USRP B210 사이의 각도를 다양하게 고정하고, 이때 추정된 각도와 ground truth를 비교하기 위한 실험을 수행함 (그림 103)
- 이 실험을 통해 MUSIC 알고리즘을 802.11p 프레임에 적용할 때 MUSIC 알고리즘의 정확성을 평가하였음

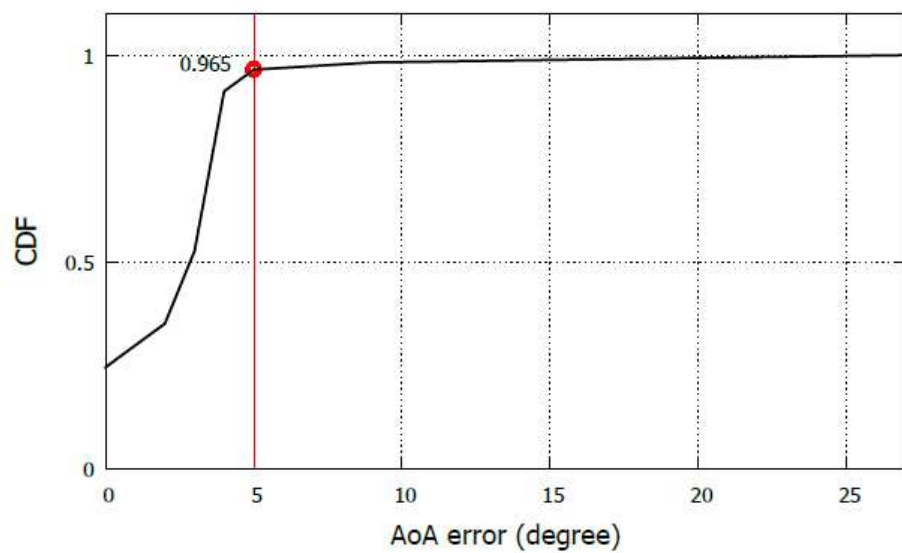


그림 104. 실내 정적 환경 실험에서 측정 오차의 누적분포함수

- 실내 정적 환경에서의 실험 결과는 위와 같으며, 그래프는 각도 변화로 인한

측정 오차의 누적분포함수 (CDF; Cumulative Density Function)를 보여줌

☞ 실험 결과의 96.5 % 이상에서 측정 오차는 5도 이내임

- 802.11p 프레임과 MUSIC 알고리즘을 사용한 AoA 측정이 비교적 정확하다는 것을 관찰하였음
- 실내 동적 실험 : 동적 환경에서도 MUSIC 알고리즘을 이용한 AoA 측정이 가능한지 여부를 확인하기 위해 추가 실험을 실행함
- 고정된 OBU가 위조된 BSM을 전송할 때 움직이는 USRP B210 장치에서 측정되는 AoA는 앞선 그림 104과 같은 경향성을 보임

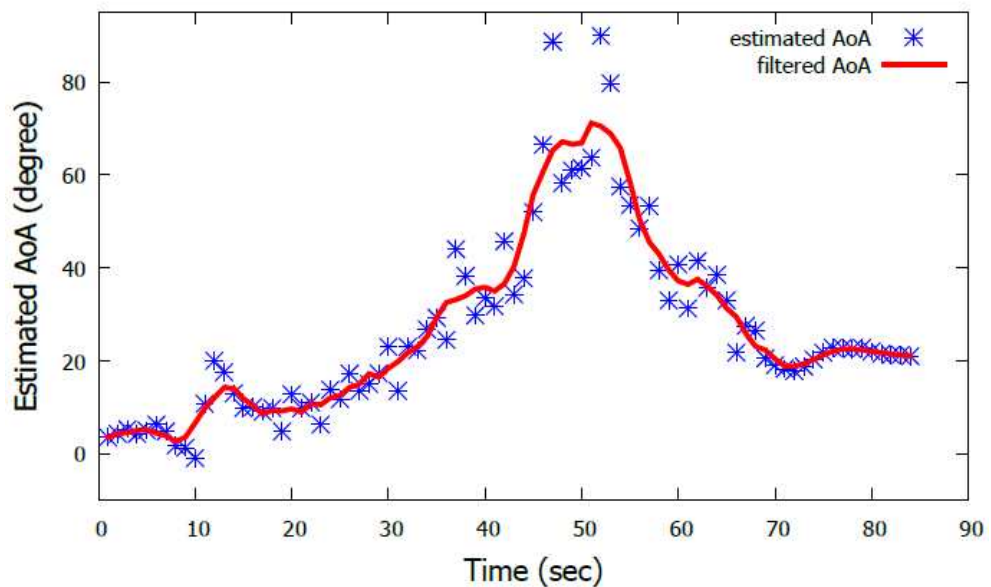


그림 105. 실내 동적 환경에서 추정된 AoA

- 실험 결과는 그림 105과 같고, 붉은색 실선은 span = 5 인 moving average filter (이동 평균 필터)가 사용되었음
- 움직임으로 인해 시간 축의 변동이 있지만, 측정된 AoA와 필터링 된 AoA는 모두 그림 102의 ground truth를 따르는 것을 확인함
- 이 실내 실험을 통해 우리는 802.11p 프레임을 사용하는 MUSIC 알고리즘이 동적 대상에 적용 가능하다는 것을 관찰함
- 실외 이동 실험 : 앞선 그림 101과 같이 실외 이동 실험을 수행하여 WAVE 통신을 사용할 때 MUSIC 알고리즘을 이용한 AoA 측정이 실제 주행 환경에서 가능한지 확인하고자 함
- 실제 주행 환경은 NLoS 조건을 생성 할 수 있으므로 NLoS의 영향을 확인하기 위해 공격자와 차량 사이에 차단 차량을 배치하였음
- 실험에서는 USRP B210 장비가 차량의 지붕에 설치되었고, OBU는 길가에 설치되어 시뮬레이션 상 공격자의 역할을 함

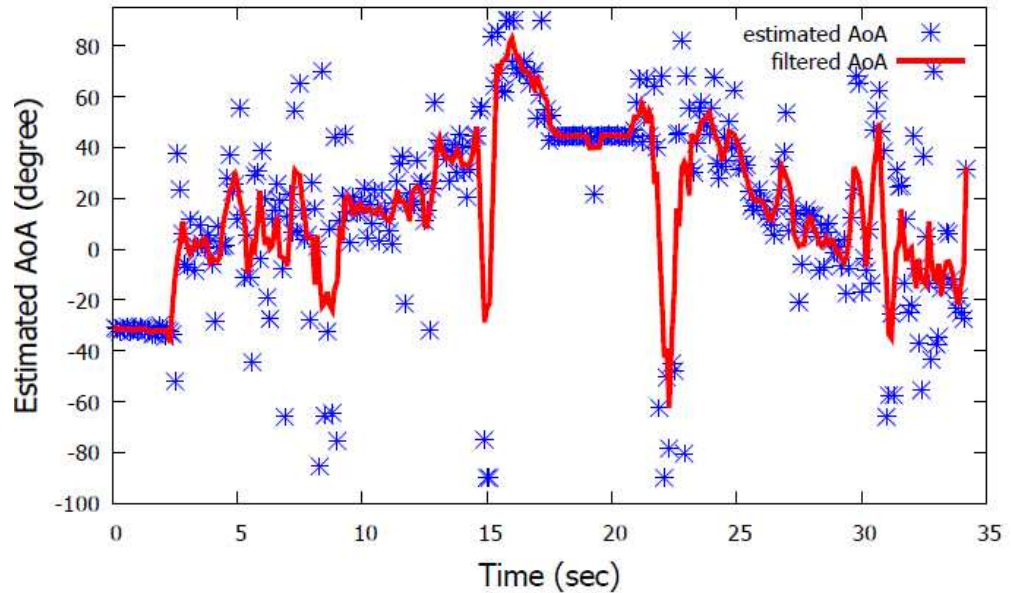


그림 106. 실외 이동 실험에서 추정된 AoA

- 실험 결과는 그림 106 그래프와 같으며, 실내 이동 실험에서와 동일하게 span = 5인 이동 평균 필터를 사용하였음
- 필터링 된 AoA는 대략적으로 앞선 그림 102의 ground truth 증가-감소 패턴을 보이지만, $t = 17$ 와 $t = 26$ 에서 급격한 감소가 관찰되고 추정된 AoA는 잦은 변동성을 보임
- 이는 차단 차량이 시험 차량을 막음으로써 신호가 NLoS 상황을 겪기 때문임
- 두 안테나에서 수신한 신호의 기저 대역 위상차가 π [78]를 초과하면 AoA가 90° 에서 -90° 로 변하는 역전 현상으로 인해 음의 값이 나타남

○ 연구 결과

- 우리 연구에서는 WAVE 통신에서 위조된 위치 정보를 전송하는 공격자를 무효화하기 위한 AoA 기반의 방법을 제안함
- 데이터의 타당성을 검사하는 세 가지 방법 중 기존의 통신 기반 방법 대신 각도 비교를 사용하는 방법을 제안하였음
- AoA 측정에는 IEEE 802.11p 프레임의 LTS를 입력 값으로 하는 MUSIC 알고리즘을 사용함
- 측정의 정확성은 상용 OBU 장비 및 SDR 장비를 통해 각도를 측정하여 검증함
- 후속 연구를 통해 NLoS 및 반전 현상으로 인한 문제를 해결할 수 있는 해결책을 고안할 것임
- 우리 연구에서는 움직이는 공격 차량의 상황을 다루지 않았으므로, AoA 측정을 통한 해당 상황의 탐지 여부를 연구할 것임

- 두 개 이상의 안테나 행렬을 사용하여 AoA 측정 성능이 향상되는지 확인하고 여러 사용자로부터 802.11p 프레임을 수신할 때 위조된 메시지를 확인할 수 있는 방법을 연구할 것임

다. 연구 개발 성과

(1) 국내외 논문 게재

번호	게재 연도	논문명	주저자명	학술지명	호	국내외 구분	SCI 여부 (SCI/비SCI)	등록번호	비고
1	2018	Reducing Message Collisions in Sensing-Based Semi-Persistent Scheduling (SPS) by Using Reselection Lookaheads in Cellular V2X	전용석	Sensors	18(12)	국외	SCI	https://doi.org/10.3390/s18124388	Impact factor 2.475
2	2019	Improving Information Age in SAE J2945 Congestion-Controlled Beacons	임승현	IEEE Communications Letters	23(2)	국외	SCI	https://doi.org/10.1109/lco.2018.2889666	Impact factor 2.723
3	2019	Flocking-based cooperative autonomous driving using vehicle-to-everything communication	박용태	Electronics Letters	55(9)	국외	비SCI	http://dx.doi.org/10.1049/el.2018.6750	Impact factor 1.232

(2) 지식재산권(특허, 실용신안, 의장, 디자인, 상표, 규격, 신제품, 프로그램)

번호	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원			등록			기여율
			출원인	출원일	출원번호	등록인	등록일	등록번호	
1	차량 간 통신에서 혼잡을 제어하기 위한 주기적 메시지 전송 설정 방법 및 장치	국내	고려대학교 산학협력단	2018.04.10	10-2018-0041646	고려대학교 산학협력단	2019.04.10	10-1969674-0000	100 %

(3) 국내 및 국제학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
1	2nd ACM International Workshop on Smart, Autonomous, and Connected Vehicular Systems and Services (CarSys) 2017	박용태	2017.10.20	Snowbird, Utah	미국
2	2017 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)	한상록	2017.11.28	Torino	이탈리아
3	IEEE Intelligent Vehicle Symposium	국승호	2018.06.28	Chang Shu	중국
4	IEEE Vehicular Networking Conference	한상록	2018.12.07	Taipei	대만
5	한국통신학회 동계종합학술발표회	국승호	2019-01-24	강원도 평창군	대한민국
6	한국통신학회 동계종합학술발표회	윤여명	2019-01-24	강원도 평창군	대한민국

(4) 인력양성

번호	취득학위	이름	성별	취득학위논문명	학위취득일
1	석사	안인선	남자	차량 간 통신환경에서 혼잡제어 알고리즘 성능 분석	2018.02.25
2	박사	국승호	남자	Pseudo-broadcast: An Alternative Mode of Vehicular Communication for Platooning	2019.02.25
3	석사	한원구	남자	차량 내부 네트워크 상의 전자제어장치 간 리눅스 TCP 성능 분석 및 개선 방안	2019.02.25

라. 연구의 기술적, 경제적 성과

(1) 1차년도

(가) 기술적 성과

○ V2X 통신을 이용한 flocking 기반 자율 협력주행 기술

- 기술의 우수성

- ☞ 기존 기술은 가시거리만 관찰할 수 있는 센서에만 의존하여 주변 차량의 의도를 파악하는 것이 실질적으로 불가능함. 또한 매우 복잡한 제어 알고리즘을 가지고 있어 폭넓은 적용이 어렵거나 적용하게 되더라도 비용이 매우 커질 수 있음
- ☞ 우리 기술은 군집의 구조적 ‘에너지’를 분석·적용하여 제어 알고리즘이 간단하고, non-local 상황에서도 적용이 가능하다는 이점이 있음
- ☞ 단순한 몇 개의 rule을 통해 자율 군집 주행 상황의 역학을 기술한다는 점에서 기존 연구 대비 우수성이 있음

- 연구 실적물

- ☞ Flocking-based cooperative autonomous driving using vehicle-to-everything communication, *Electronics Letters*

(나) 경제적 성과

- 최소한의 제약을 가지는 flocking 행동 모델을 연구개발하는 것은 자율 군집 주행을 위한 차량 및 부품을 만드는 제조사들에게 제품 생산에 최대한의 자유도를 제공하여 차량 및 부품 생산을 용이하게 함. 또한 주변 차량의 의도를 반영한 주행 결정으로 군집 주행에서의 사고율을 낮추게 되어 그로 인한 경제적 비용을 절감할 수 있게 될 것임

(2) 2차년도

(가) 기술적 성과

○ 군집 주행을 위한 Pseudo-Broadcast 통신 기법

- 기술의 우수성

- ☞ 기존 기술 중 Broadcast 방식의 전송은 데이터 도착에 대한 낮은 신뢰성을 보인다는 단점이 있음. 반면 Unicast 통신 방식의 경우에는 많은 무선 자원을 소모한다는 단점이 있음. 이러한 기존 기술들을 군집 주행에 적용하면 군집의 높은 전송 주기로 인해 무선 자원 독점 현상이 일어날 수 있음
- ☞ 우리 기술은 1:1과 1:다 통신 기법을 혼합하여 Channel 사용이 적으며, 재전송을 통한 안정적인 전송이 가능하다는 이점이 있음

☞ Pseudo-Broadcast를 군집의 통신에 적용한 최초의 연구로, 군집의 안정적인 통신을 보장하면서 군집 주변의 비 군집 차량들에 미치는 영향을 최소화할 수 있는 연구라는 점에서 국내외 기존 기술 대비 매우 높은 경쟁력을 지니고 있음

- 연구 실적물

☞ Pseudo-Broadcast: An Alternative Mode of Vehicular Communication for Platooning, *IEEE Communications Magazine* (IF=10.435, 게재 예정)

(나) 경제적 성과

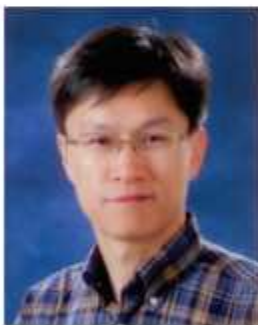
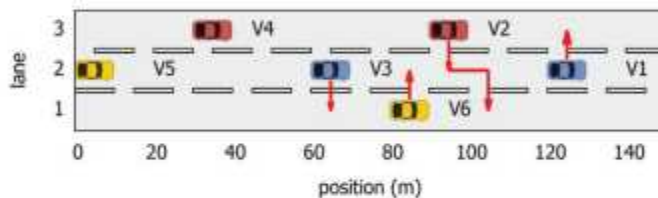
○ 자율 군집 주행을 지원하기 위한 차량 간 통신 장치가 개발되고 장착되는 시점에서 표준의 변경이나 하드웨어적인 업그레이드 필요하지 않고 소프트웨어 업데이트를 통해 즉시 사용할 수 있기 때문에 매우 적은 비용으로 도입이 가능함. 또한 무선 자원의 추가적인 할당 없이 기존에 할당받은 무선 채널을 사용하며 동일한 효과를 얻기 위한 무선 자원의 필요량 또한 줄어들기 때문에 경제적으로 많은 비용이 절감할 수 있을 것으로 생각됨

마. 연구 성과의 우수성

- 연구 실적 중 Electronics Letters에 게재된 Flocking-based cooperative autonomous driving using vehicle-to-everything communication 논문은 해당 호의 가장 흥미로운 논문 (Featured Article)으로 선정되었음

Natural behaviours mimicked in vehicle communications to aid autonomous driving decision making

flock together



TBP: vehicle manoeuvre diagram as dictated by the proposed flocking rules. 887106 Corresponding author Hyogun Kim.

Researchers from the College of Information and Communications in Korea University discuss the difficulties that purely line-of-sight (LoS) sensor information poses for autonomous driving decisions. The proposed Letter shows how the addition of vehicular communication to autonomous driving theory assists in effective decision making with the controller mimicking flocking behaviour found in nature.

Introduction

V2X stands for "vehicle-to-everything" communication and can be used between vehicles (V2V), between vehicles and infrastructure (V2I), pedestrians (V2P), or networks (V2N). It has been developed to facilitate driving safety, road efficiency, and other new services. There are two competing technologies for V2X communication: ITS-G5 and cellular technology. The European Commission has recently published a Delegated Regulation based on ITS-G5, to create the minimal legal requirements for computer software's ability to exchange and utilise information and to enable large-scale deployment of V2X services. After decades of research and field trials, V2X is now becoming law and reality.

V2X is considered indispensable for effective autonomous driving systems. The sensors employed by autonomous vehicles all require LoS conditions to work properly. However, many dangerous situations during driving involve entities that cannot be seen behind view-blocking objects (curves, cars in front, etc.). Therefore, car makers/original equipment manufacturers (OEMs) want to include V2X communications in their autonomous driving logic to supplement the sensing capability of their vehicles and facilitate coordination with vehicles from other vendors. Unfortunately, there is no standard today that OEMs can agree on to orchestrate their autonomous driving logic and so a minimum coordinating scheme based on V2X is needed.

Effective communication

As requiring OEMs to develop and adopt a common autonomous driving logic (overriding their existing products altogether) is unfeasible, a shared coordination scheme with a simple interface between OEMs with a minimal set of macro-rules dictating the cooperative autonomous driving manoeuvres is a preferable, and necessary, option. As autonomous vehicles already have complex logic controlling their own moves, these could be used to implement the macro-rules into their own internal style. Co-author Hyogun Kim discusses the groups' approach given this constraint: "A good candidate framework for such a minimal set of rules dictating coordinated moves was flocking, exhibited by birds and fish in nature. If these animals are autonomous vehicles, with superb sensing and actuation capabilities, the simple flocking rules that the animals keep are the rules to govern the vehicle controls. So, we implemented the basic flocking rules for autonomous vehicles in the driving environment."

Existing vehicle coordination techniques typically assume that the vehicle control logic applies globally for all vehicles. But this is not realistic now nor in the future. The groups work will not require OEMs to open their technology or assume an identical control logic as it only assumes that vehicles with disparate internal control logics will implement the small set of cooperation rules that are enforced through standard V2X communication.



Page 525, Flocking-based cooperative autonomous driving using vehicle-to-everything communication, T. Park, S. Kim, S. Han, S. Lim and H. Kim.

Borrowing rules that have been time-tested in large scales in nature has provided the team some confidence that they will work when applying them to the road environment. The rules are top-down, so that OEMs may use whatever autonomous technology they have to implement them. If they are implemented correctly, vehicles can trust others from different vendors. This follows the wisdom of modular design, drastically reducing the complexity of a system which otherwise would need to adapt to communicate and integrate with every type of vehicle.

Stay in your lane

Flocking manoeuvres in nature can be explained with three basic rules: separation, alignment, and cohesion. Although the same rules apply to the driving environment, more constraints and peculiarities arise. First, in nature, animals move in 3-dimensional space with no clear boundaries. In the driving environment, vehicles visually move in 1 dimension (roads) and in very narrow lanes. Second, different vehicles may have different needs and propensities. Some want to stay on the current road, others want to exit. Some drive fast, others slow. These additional constraints and idiosyncrasies had to be accounted for in the flocking rules framework.

Current V2X protocols have few provisions for the coordination of autonomous vehicles from different vendors. In the short-term, this work will facilitate the development of V2X communication protocols for coordinated autonomous driving. In the long-term, this work will serve as an example of what a practical coordinated autonomous driving framework should strive for. Although autonomous vehicles typically driving alone today, they will soon begin to run across others made by other OEMs. Therefore, discussions will soon have to begin as to how the autonomous driving intelligences of various vendors can avoid being in conflict or even adversarial with each other.

The road ahead

Doctor Kim gives his thoughts on the future of the group and of the field as follows: "We will test the current scheme under more diverse traffic situations and enhance the flocking rules if necessary, alongside developing matching features in V2X communication. We think that the autonomous vehicles industry will come together to develop a common coordination framework between vehicles to prevent dangerous situations due to a lack of agreed-upon manoeuvres. But as driving scenarios are more complex than natural flocking or schooling, the rules governing this framework may grow in number and become more complex. We think there will be a significant amount of discussion on where the line is drawn between top-down rules and detailed control implementations."

○ 또한 게재 예정이었던 “Pseudo-Broadcast: An Alternative Mode of Vehicular Communication for Platooning. IEEE Communications Magazine, 2019, 57.6: 56-61.” 논문이 Impact Factor (IF)가 10.356인 우수 SCI 저널에 게재되었음 (6월 21일 게재). 이 외에도 IF가 2를 넘는 2편의 SCI 논문을 게재하였음.

○ 국제 학술회의 4건 중 1건은 Google Scholar의 Top Publication (인용 지수인 h5-index를 기준으로 순위를 선정)에서 학술 회의 중 최상위 랭크에 속하는 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (h5-index=35)에서 논문을 발표하였음

3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

가. 목표

구분	내용
최종 목표	자율 군집 주행을 위한 군집 행동 모델 및 WAVE 표준 기반 응용 프로토콜 원천 기술 개발
세부 목표	● 1차 연도: 최소한의 제약과 최대한의 자율을 보장하는 bio-inspired 행동 모델 기반의 자율 군집 주행 연구 - 자율 군집 주행에 적합하게 요구 사항이 최소화된 flocking 행동 모델 연구 ☞ Flocking 행동 모델의 적용 방법 연구 ☞ 자율 군집 주행에 적합한 요구 사항 선정 방법 연구 ☞ 자율 주행 차량의 자율성 보장 및 복잡도 감소를 위한 제약의 최소화 연구 - 최소화된 flocking 행동 모델 기반의 자율 군집 주행 알고리즘 개발 및 타당성 검증 연구 ☞ Flocking 행동 모델의 자율 군집 주행 적용을 위한 알고리즘 개발 ☞ 시뮬레이터를 이용한 검증 및 성능 측정 연구 ☞ 다른 군집 형태와의 비교를 통한 개선점 파악 연구 ● 2차 연도: 자율 군집 주행을 위한 V2X 통신상의 WAVE 표준 기반 응용 프로토콜 및 서비스 연구 - V2X 통신상에서 자율 군집 주행을 지원하기 위한 WAVE 표준 기반 응용 프로토콜 설계 및 개발 ☞ 자율 군집 주행을 위한 SAE J2735 기반의 응용 메시지 형식 연구 ☞ 군집과 군집 간의 통신, 멀티 홉 통신을 가능하게 하는 응용 프로토콜 연구 ☞ 군집 내 효율적인 차량 간 정보 전달 방법 연구 ☞ 자율 군집 주행 응용 서비스의 세부 기능 설계 및 개발 - 자율 군집 주行的 안정적인 지원을 위한 V2X 통신의 신뢰성 및 보안성 문제 탐색 및 해결 방안 연구 ☞ 자율 군집 주行的 안정성 향상을 위한 V2X 통신 신뢰성 보장 연구 ☞ 자율 군집 주행 차량과 운전자를 공격하거나 개인 정보를 침해하는 시도를 방어하는 연구 ☞ 시뮬레이션을 이용한 연구 결과 검증

나. 목표 달성여부

(1) 최종 성과 목표 및 달성도

성과지표	성과 목표	달성도
SCI(E)급 학술지 게재(2점)	1건	200% (2건)
일반학술지게재(1점)	2건	50% (1건)
특허출원(1점)	2건	50% (1건)
특허등록(2점)	1건	100% (1건)
디자인 등록(1점)		
소프트웨어(1점)		
하드웨어(1점)		
기타(1점)		9건 추가 달성
소계(점수)	8점	17 점

기타 성과:

국내 및 국제학술회의 발표(6건: 국외 4건 + 국내 2건) + 인력양성(3건: 박사 1명, 석사 2명)

(2) 연차별 성과 목표 및 달성도

구분	핵심성과 (CTE)		단위성과		성과점검기준							양적 성과 건수	
					질적 성과지표	목표치	달성치	측정방법	검증방법	기준치			
주관	1	최소한의 제 약과 최대한 의 자율을 보 장 하 는 flocking 행 동 모델 기 반 자율 군 집 주행 알 고리듬	1-1	요구사항이 최 소 화 된 flocking 행동 모델	①	특허 출원	1건	0건	출원	출원서	2	특허: 출원 <u>1</u> 건 등록 <u>1</u> 건 논문: <u>1</u> 건 사제품: <u>1</u> 건 SW: <u>1</u> 건 학술발표 <u>1</u> 건	
				②	논문	0건	1건	게재	논문집	8			
			1-2	최 소 화 된 flocking 행동 모델 기반 자 율 군집 주행 알고리듬	①	논문	1건	0건	게재	논문집	6		특허: 출원 <u>1</u> 건 등록 <u>1</u> 건 논문: <u>1</u> 건 사제품: <u>1</u> 건 SW: <u>1</u> 건 학술발표 <u>1</u> 건
				②	학술 발표	0건	1건	발표	학술대회 논문 모음집	4			
	2	자율 군집 주 행을 위한 V2X 통신상의 WAVE 표준 기반 응용 프 로토콜 및 서 비스	2-1	자율 군집 주행 지원을 위한 V2X 통신상의 WAVE 표준 기반 응용 프로토콜	①	특허 출원 특허 등록	1건	출원건 등록건	출원 등록	출원서 등록특허 공보	16	특허: 출원 <u>1</u> 건 등록 <u>1</u> 건 논문: <u>1</u> 건 사제품: <u>1</u> 건 SW: <u>1</u> 건 학술발표 <u>3</u> 건	
					②	논문	1건	2건	게재	논문집	20		
					③	학술 발표	0건	3건	발표	학술대회 논문 모음집	8		
			2-2	자율 군집 주행 신뢰성 및 보안 성 보장을 위한 요소 기술	①	특허 등록	1건	0	등록	등록특허 공보	8	특허: 출원 <u>1</u> 건 등록 <u>1</u> 건 논문: <u>1</u> 건 사제품: <u>1</u> 건 SW: <u>1</u> 건 학술발표 <u>2</u> 건	
					②	논문	1건	1건	게재	논문집	20		
					③	학술 발표	0건	2건	발표	학술대회 논문 모음집	8		
계									100	특허: 출원 <u>1</u> 건 등록 <u>1</u> 건 논문: <u>3</u> 건 사제품: <u>1</u> 건 SW: <u>1</u> 건 학술발표 <u>6</u> 건			

[1차년도]

구분	핵심성과 (CTE)		단위성과		성과점검기준						양적 성과 건수
					질적 성과지표	목표치	달성치	측정방법	검증방법	기준치	
주관 1	최소한의 제약과 최대한의 자율을 보장하는 flocking 행동 모델 기반 자율 군집 주행 알고리즘	1-1	요구사항이 최소화 된 flocking 행동 모델	①	특허 출원	1건	0건	출원	출원서	10	특허: 출원 <u>1 건</u> 등록 <u>1 건</u> 논문: <u>1 건</u> 사제품: <u>1 건</u> SW: <u>1 건</u> 학술발표 <u>1 건</u>
				②	논문	0건	1건	게재	논문집	40	
		1-2	최 소 화 된 flocking 행동 모델 기반 자율 군집 주행 알고리즘	①	논문	1건	0건	게재	논문집	30	특허: 출원 <u>1 건</u> 등록 <u>1 건</u> 논문: <u>1 건</u> 사제품: <u>1 건</u> SW: <u>1 건</u> 학술발표 <u>1 건</u>
				②	학술 발표	0건	1건	발표	학술대회 논문	20	
계										100	특허: 출원 <u>1 건</u> 등록 <u>1 건</u> 논문: <u>1 건</u> 사제품: <u>1 건</u> SW: <u>1 건</u> 학술발표 <u>1 건</u>

[2차년도]

구분	핵심성과 (CTE)		단위성과		성과점검기준						양적 성과 건수
					질적 성과지표	목표치	달성치	측정방법	검증방법	기준치	
주관 2	자율 군집 주행을 위한 V2X 통신상의 WAVE 표준 기반 응용 프로토콜 및 서비스	2-1	자율 군집 주행 지원을 위한 V2X 통신상의 WAVE 표준 기반 응용 프로토콜	①	특허 출원 특허 등록	1건	출원건 등록건	출원 등록	출원서 등록특허 공보	20	특허: 출원 1 건 등록 1 건 논문: 1 건 사제품: 1 건 SW: 1 건 학술발표 3 건
				②	논문	1건	1건	게재	논문집	25	
				③	학술 발표	0건	3건	발표	학술대회 논문	10	
		2-2	자율 군집 주행 신뢰성 및 보안성 보장을 위한 요소 기술	①	특허 등록	1건	0건	등록	등록특허 공보	10	특허: 출원 1 건 등록 1 건 논문: 1 건 사제품: 1 건 SW: 1 건 학술발표 2 건
				②	논문	1건	1건	게재	논문집	25	
				③	학술 발표	0건	2건	발표	학술대회 논문	10	
계									100	특허: 출원 1 건 등록 1 건 논문: 2 건 사제품: 1 건 SW: 1 건 학술발표 5 건	

다. 목표 미달성 시 원인(사유) 및 차후대책(후속연구의 필요성 등)

- 일반학술지 게재의 달성도가 부족한 부분은 SCI에 논문을 게재하였기 때문임
- 현재 SCI(E)급 학술지 1건이 accept 되어 게재 예정임
- 우리 연구진은 성과 목표를 초과하여 달성하였으므로 차후대책이 필요하지 않음

4. 연구개발성과의 활용 계획 등

가. 2019년 현재 관련 연구 동향

○ 국내

- 국내에서는 2018년 국토교통부를 중심으로 자율주행 버스와 화물차를 개발하고 이를 대중교통, 물류 등 교통서비스에 도입하기 위한 실증 연구가 시작됨. 특히 ‘차량-사물통신(V2X) 기반 화물차 군집주행 운영기술 개발’ 연구개발 사업이 본격 착수되었고, 이는 크게 군집주행 차량의 안전주행 제어기술 개발과, 자동차 전용도로 기반 V2X 군집주행 운영 및 연구실증 기술 개발로 나뉨.
- 한국도로공사 스마트도로연구단 (군집주행 연구단)은 이와 관련하여 2019 국토교통 기술대전에서 군집주행 시나리오, 군집주행을 위한 인지/판단/제어 알고리즘, 군집주행 지원을 위한 인프라 안전/운영 서비스에 대한 연구 내용을 전시하였음. 연구단은 1차년도(2018)는 군집시스템 및 차량 컨셉을 설계, 2차년도(2019)에는 선두차량 1대, 추종차량 1대를 운행하고 3차년도(2020)에는 선두차량 1대, 추종차량 2대를, 마지막 4차년도(2021)에는 선두 차량 1대가 추종차량 3대를 이끄는 점진적 연구 성과를 계획하고 있음

○ 국외

- 국외에서도 트럭 군집주행 기술 채택을 위한 노력이 계속되고 있음. 네덜란드 응용 과학 연구 기구 (the Netherlands Organisation for Applied Scientific Research) 의 Dr Marika Hoedemaeker는 앙상블(Ensemble) 이라는 프로젝트를 통해 트럭 군집주행 기술 채택을 가속화하는 것을 목표로 하고 있으며, 이는 도로 인프라, 환경, 교통에 영향을 끼칠 것이라고 강조함. 이 프로젝트는 3년에 걸쳐 진행되고, 2021년에 최대 7대의 서로 다른 제조사로부터의 트럭으로 군집주행 데모를 선보일 것이라고 함

나. 추가 연구의 필요성

○ 인공 지능 (Artificial Intelligence)과의 융합 연구

- 우리 연구에서 개발하고자 한 최소한의 제약과 최대한의 자율을 보장하는 행동 모델은 객체 각자가 지능을 갖는다는 점에서 AI를 활용하기에 매우 적합함
 - ☞ 우리 연구 과제는 군집 주행에서 효율성과 안정성을 증가시키는데 목적을 두고 flocking 행동 모델을 군집 주행에 적용하여 각 차량이 최소한의 요구조건만을 만족시키며 스스로 결정하여 주행하도록 하며, 이 과정에서 필요한 정보를 통신을 통해 교환하며 정해진 프로토콜을 따라서 수행하도록 하는데 목적이 있음
 - ☞ 특히 강화학습 (Reinforcement Learning)은 state, action, reward를 가지고 최대의 reward를 획득하기 위한 학습을 수행하는 머신러닝의 한 부분으로 차량

의 상태가 다양한 변수들로 구성되어 있고 이에 따라 결정할 수 있는 action이 매우 많은 경우에 효율적인 학습 방법으로 최근에 많은 연구가 수행되고 있는 연구 분야임

- ☞ flocking 행동 모델은 일정한 간격이 유지되도록 지속적으로 속도나 가속도를 조절하도록 하고 있는데 수행한 연구 모델의 군집은 차량의 거리를 기반으로 속도와 가속도를 조절 및 차선 변경 여부를 결정하여 flocking 모양이 되도록 하여 군집의 모양을 유지하는데 주목적이 있으며 교통 흐름을 원활하게 하거나 급작스런 상황에 대응하기 위해 강화학습 기반의 연구를 수행 중이며 추가적인 연구가 필요한 상태임
- ☞ 군집의 구성과 유지 및 해체를 위해 필수적인 통신에서도 모든 차량들이 자신의 위치를 정확하게 알려주기 위해 매우 빠른 주기와 높은 전력으로 전송할 수 있으나 모든 차량이 이렇게 전송하는 경우 무선자원을 낭비할 뿐 아니라 충돌로 인해 패킷이 제대로 전달되지 않는 문제가 있음
- ☞ WAVE 기반의 통신 방식에서 채널 사용에 있어 표준이 가지고 있는 문제점을 해결하기 위한 연구를 수행하였지만 넓은 공간에서 각 차량들에 대해 적용되는 알고리즘이 최적인지에 대해 검증하기가 어려우며 이를 수식으로 표현하기도 어려운 문제를 가지고 있기 때문에 최적의 알고리즘을 찾기 위해서 강화학습을 기반으로 연구를 진행하고 있으며 추가적인 연구가 필요한 상태임
- ☞ 차량 무선 통신 환경에서 C-V2X 통신은 기지국에서 무선자원을 할당하는 mode 3 방법과 표준에서 정의하는바와 같이 주기적으로 차량들이 무선 채널들의 상태를 보고 사용할 무선 채널을 변경 또는 유지하며 사용하는 mode 4 방식이 있음
- ☞ C-V2X를 통한 통신에서 앞서 언급한 mode 4와 같이 무선 자원을 차량이 직접 선택하여 사용하는 경우에 대한 연구를 수행하였으나 이는 무선 채널 선택에 대한 연구이며 그 외에 전송 파워 조절이나 전송 주기를 조절하는 것과 같은 추가적인 연구가 필요함
- ☞ 이 부분에 대해 정의된 reward를 통해 미리 쌓아둔 데이터 없이도 학습하는 강화학습 기반의 최적화 연구가 필요함
- ☞ 또한 Transfer learning을 활용하면 각 개체가 경험한 학습 내용을 서로 공유하여 더욱 발전된 지능을 만드는 일이 가능함

○ Cellular V2X (C-V2X)와의 호환 및 결합 연구

- 3GPP의 5G 표준화가 2020년 공식적으로 확정될 예정이고, 이는 국제 표준으로 승인될 것으로 여겨져 상용화도 동시에 진행 중이며 이를 기점으로 다양한 5G 기반의 융합 서비스들이 새로운 비즈니스를 창출하고 4차 산업혁명을 이끌게 될 것이며 V2X가 그 한 축을 담당할 것임

- ☞ 3GPP에서 C-V2X 표준화를 진행 중이고, 5G의 진화 기술 Work Item (WI)에 NR-V2X가 포함될 정도로 V2X가 5G의 주요 활용 분야로 여겨지고 있음
- ☞ 기존의 V2X 시나리오와 더불어 3GPP에서 추가로 정의한 eV2X 시나리오는 네 가지 분류로 나눌 수 있는데 각각의 분류에 대한 요구사항은 아래와 같음 (그림 108)

	데이터 전송률	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%

그림 108. 3GPP에서 정의한 eV2X 시나리오 서비스 요구사항

- ☞ 우리 연구에서 수행한 군집 주행과 관련하여 eV2X 시나리오에서는 기존 메시지들과 비교하면 더 다양하고 많은 센서 데이터가 추가된 메시지를 전송하기 때문에, 더 높은 전송률을 요구함. 따라서 위의 요구조건을 만족시키기 위한 추가적인 연구가 필요할 것임
- ☞ 이에 관한 연구의 시작으로, 우리 연구에서는 C-V2X 통신에서 무선 자원 스케줄링 알고리즘을 개선함으로써 통신 신뢰성을 높이려고 하였음
- ☞ C-V2X는 초기 단계에서는 WAVE 기반 V2X 통신에서 사용하는 동일한 주파수 대역인 5 GHz를 사용하려는 움직임을 보이고 있어 이들 기술이 조화를 이루도록 하는 연구가 필요함
- ☞ C-V2X의 후반부에서는 5G 통신 기술의 use cases 중 하나인 Ultra Reliable Low Latency Communications (URLLC)을 V2X 통신에 활용하고자 함
- ☞ URLLC를 사용하는 C-V2X와 WAVE 기반 V2X 통신을 상황에 따라 취사 선택하여 사용하는 결합 연구가 필요함
- ☞ 앞서 언급한 기지국에서 무선자원을 할당하는 방식인 mode 3는 기지국에서 무선 자원을 할당하기 때문에 동일한 무선 채널을 선택하고 전송하여 발생하는 충돌과 같은 문제가 없음
- ☞ 하지만 기지국에서 차량에 무선자원을 할당하기 위한 과정에서 발생하는 통신 오버헤드가 있기 때문에 이 오버헤드를 줄이기 위해 채널 할당을 효율적으로 수행할 수 있도록 하는 연구가 필요함
- ☞ Mode 4를 사용하는 차량들은 무선 채널을 직접 선택하기 때문에 채널을 할당하는 오버헤드는 없지만 선택 과정에서 다른 차량과 동일한 채널을 선택하는 경우 무선 전송 과정에서의 패킷 충돌 가능성이 있음
- ☞ 따라서, 무선 자원의 선택 과정에서 동일한 자원을 선택하지 않도록 하고, 만

일 충돌이 발생하는 경우 이를 빠르게 알아차리고 새로운 자원을 선택할 수 있도록 하는 연구가 필요함

다. 타 연구에의 응용

○ V2V 통신 연구

- V2V 통신 기술은 자율 군집 주행의 안정성 향상을 위해서 사용할 뿐만 아니라 자율 주행 및 일반 차량의 안전성 향상을 위해서 사용할 수 있음
 - ☞ 우리 과제를 통해 얻은 V2V 통신 기술의 신뢰성을 보장하는 연구는 자율 군집 주행을 위해서 뿐만 아니라 V2V 통신 기술을 활용하는 연구 분야에 응용될 수 있음

○ 무선 통신 보안 연구

- 위조된 위치 정보를 의도적으로 V2V를 통해 전송하는 악의적인 공격자는 자율 군집 주行的 효과를 떨어뜨릴 뿐만 아니라, 자율 군집 주행 차량의 안전을 위협할 수 있음
- 이러한 공격에 대해 방어할 수 있는 속삭임을 통한 메시지 내용 유효성 검사 (message content plausibility check through low-power beaconing) 연구는 자율 군집 주행 상황에서 뿐만 아니라, V2V 통신이나 무선 통신 시에도 적용할 수 있어 타 분야의 보안 연구에 응용할 수 있음

○ 5G 기반 자율협력주행 연구

- 자율협력주행 연구에서는 최근 국내외에서 주목하고 있는 5G 통신 기술을 적극적으로 활용하려고 하는 추세에 있음
- ‘C-V2X에서 차량 간 통신의 충돌 감소를 위한 SPS 알고리즘 개선 연구’에서 제시한 알고리즘을 자율협력주행 연구에 적용하여 차량 통신 효과를 높일 수 있음
- 해당 연구는 후속 연구가 필요할 것으로 판단되어 국토교통부의 ‘자율협력주행을 위한 LDM 및 V2X기반 도로시스템 개발’ 사업의 새로운 연구 과제로 제안, 선정되어 ‘5G 기반 자율협력주행 도로 데이터 수집배포 프로토콜 및 통신 아키텍처 연구’라는 신규과제에서 후속 연구를 진행 중임

라. 관련 산업에의 기술 이전

○ 연구개발성과를 특허로 출원함으로써 국내 관련 산업의 기술 발전에 도움을 주고자 함

- 세계 최초로 연구한 Pseudo-broadcast 기법에 대한 논문이 telecommunications 분야 2위 저널 (IF=9.270)에 게재될 예정이고, 이를 특허 출원하여 기술 이전을 위한

발판을 마련할 것임

- 앞으로의 원활한 기술 이전을 위하여 현재 관련 업체 (start-up)와 특허 출원을 위한 협력을 진행하고 있음

○ 연구개발성과를 표준화에 반영하여 국제 표준을 확보하고자 함

- 연구과제의 주요 성과에 대해 정부 지원 사업 및 표준화 지원센터를 통해 표준화 가능 여부를 검토하고 이를 수행하려고 함
- 연구과제의 수행에 있어 각 기술에 대한 표준에서 크게 벗어나지 않도록 연구를 수행하였기 때문에 표준화에 기여하는 것이 어렵지 않을것으로 고려됨

붙임. 참고문헌

- [1] L. Dormehl. 6 self-driving car crashes that tapped the brakes on the autonomous revolution, <https://www.digitaltrends.com/cool-tech/mostsignificant-self-driving-car-crashes/>, 2018
- [2] C. W. Reynolds. Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model, *Computer Graphics*, 21(4), pp. 25-34, 1987
- [3] European Telecommunications Standards Institute (ETSI). Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service. ETSI TS 102 637-2 V1.2.1, March 2011
- [4] Society of Automotive Engineers (SAE). Dedicated short range communications (DSRC) message set dictionary. SAE J2735, March 2016
- [5] R. Olfati-Saber. Flocking for multi-agent dynamic systems: algorithms and theory, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 51(3), pp. 401-420, 2006
- [6] R. Lamm, B. Psarianos, and T. Mailaender. Highway design and traffic safety engineering handbook. McGraw-Hill, New York, 1999
- [7] ETSI: ETSI TR 102 638 V1.1.1 Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Definitions (2009)
- [8] C. Wu, S. Ohzahata, and T. Kato, "VANET Broadcast Protocol Based on Fuzzy Logic and Lightweight Retransmission Mechanism," *IEICE Trans. Commun.*, Vol.E95-B, No.2, pp.415-425, 2012
- [9] AUTOSAR. Specification of TCP/IP Stack AUTOSAR CP Release 4.3.1. <https://www.autosar.org/standards/classic-platform/classicplatform-431/>, 2017
- [10] D. D. Clark. Window and Acknowledgement Strategy in TCP. RFC 813, 1982
- [11] S. Kuk, Y. Park, and H. Kim. Enhancing the performance of vehicle-to-vehicle realtime video streaming for platoons. In *Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, IEEE, 2018.
- [12] A. Kamerman and L. Monteban. WavelanR -ii: a gh-performance wireless lan for the unlicensed band. *Bell Labs technical journal*, 2(3):118-133, 1997.
- [13] M. Lacage, M. Hossein Manshaei, and T. Turletti. Ieee 802.11 rate adaptation: a practical approach. In *Proceedings of the 7th ACM international symposium on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems*, pages 126-134. ACM, 2004.
- [14] S. HY Wong, H. Yang, S. Lu, and V. Bharghavan. Robust rate adaptation for 802.11 wireless networks. In *Proceedings of the 12th annual international conference on Mobile computing and networking*, pages 146-157. ACM, 2006.
- [15] J. P Pavon and S. Choi. Link adaptation strategy for ieee 802.11 wlan via received signal strength measurement. In *Communications, 2003. ICC'03. IEEE International Conference on*, volume 2, pages 1108-1113. Citeseer, 2003.
- [16] G. Holland, N. Vaidya, and P. Bahl. A rate-adaptive mac protocol for multi-hop wireless networks. In *Proceedings of the 7th annual international conference on Mobile computing and networking*, pages 236-251. ACM, 2001.
- [17] G. Judd, X. Wang, and P. Steenkiste. Efficient channelaware rate adaptation in dynamic environments. In *Proceedings of the 6th international conference on Mobile systems, applications, and services*, pages 118-131. ACM, 2008.
- [18] Z. Wang and M. Hassan, "Blind XOR: Low-overhead loss recovery for vehicular safety communications," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 61, no. 1, pp. 35-45, Jan. 2012.
- [19] C.-J. Hsu, J. Fikentscher, and R. Kreeb, "Development of potential methods for testing congestion control algorithm implemented in vehicle-to- vehicle communications," *Traffic Injury Prevention*, vol. 18, no. 1, pp. S51-S57, May 2017.
- [20] A. Rostami, H. Krishnan, and M. Gruteser, "V2V safety communication scalability based on the SAE J2945/1 standard," in *Proc. Workshop ITS Amer.*, 2018, pp. 1-10.
- [21] "Communications scalability for V2V safety development and phase 2 final report—Communications, scalability for V2V safety analysis," U.S. Nat. Highway Traffic Safety Admin., Washington, DC, USA, Tech. Rep. NHTSA-2015-0060-0001, 2016, vol. 2.
- [22] C.-J. Hsu, "Information age in forward collision warning based on vehicle-to-vehicle communications—Sensitivity analysis," *Transp. Res. Rec.*, vol. 2559, no. 12, pp. 101-107, 2016.
- [23] M. Treiber and A. Kesting, *Traffic Flow Dynamics: Data, Models and Simulation*. Berlin, Germany: Springer, 2013, p. 28.
- [24] B. Toghi et al., "Multiple access in cellular V2X: Performance analysis in highly congested vehicular networks," in *Proc. IEEE VNC*, Dec. 2018, pp. 1-8.
- [25] "Vehicle safety communications project: Final report," U.S. Nat. Highway Traffic Safety Admin., Washington, DC, USA, Tech. Rep. DOT HS 810 591, 2006.
- [26] Vinel, A., Lan, L., & Lyamin, N. (2015). Vehicle-to-vehicle communication in C-ACC/platooning scenarios. *IEEE Communications Magazine*, 53(8), 192-197.
- [27] Sepulcre, M., Gozalvez, J., & Coll-Perales, B. (2017). Why 6Mbps is not (always) the Optimum Data Rate for Beaconing in Vehicular Networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 16(12), 3568-3579.
- [28] M. P. Lammert, A. Duran, J. Diez, K. Burton, and A. Nicholson. Effect of platooning on fuel consumption of class 8 vehicles over a range of speeds, following distances, and mass. *SAE Int. J. Commer. Veh.*, 7:626-639, 09 2014

- [29] Y. Bouchaala, M. Marouf, M. Abualhoul, E. Pollard, O. Shagdar, and F. Nashashibi. WAVE Low Latency Video Streaming for Platooning Safety Real-Time Application. In Proc. of the IEEE Vehicular Networking Conference (VNC), Dec 2013
- [30] A. Vinel, E. Belyaev, K. Egiazarian, and Y. Koucheryavy. An overtaking assistance system based on joint beaconing and real-time video transmission. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 61(5):2319–2329, Jun 2012
- [31] B. Bellalta, E. Belyaev, M. Jonsson, and A. Vinel. Performance evaluation of ieee 802.11p-enabled vehicular video surveillance system. IEEE Communications Letters, 18(4):708–711, April 2014
- [32] E. Belyaev, A. Vinel, M. Jonsson, and K. Sjöberg. Live video streaming in ieee 802.11p vehicular networks: Demonstration of an automotive surveillance application. In 2014 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS), pages 131–132, April 2014
- [33] IEEE Standard for Information technology–Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks–Specific requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. IEEE Std 802.11-2016 (Revision of IEEE Std 802.11-2012), pages 1–3534, Dec 2016
- [34] Y. Park, C. Jo, S. Yun, and H. Kim. Multi-room iptv delivery through pseudo-broadcast over ieee 802.11 links. In 2010 IEEE 71st Vehicular Technology Conference, pages 1–5, May 2010
- [35] IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) – Networking Services. IEEE Std 1609.3-2016 (Revision of IEEE Std 1609.3-2010), pages 1–160, April 2016
- [36] IEEE Standard for Information technology– Local and metropolitan area networks– Specific requirements– Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 1: Radio Resource Measurement of Wireless LANs. IEEE Std 802.11k-2008 (Amendment to IEEE Std 802.11-2007), pages 1–244, June 2008
- [37] SWOV Fact sheet. Headway times and road safety, December 2012.
- [38] QualNet 5.1 Simulator. <http://web.scalable-networks.com/qualnetnetwork-simulator-software>.
- [39] National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA). US DoT advances connected vehicle technology to prevent hundreds of thousands of crashes, December 2016
- [40] 3GPP, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2 (v14.3.0, Release 14),” 3GPP, Tech. Rep. 36.300, June 2017.
- [41] Nabil, A.; Marojevic, V.; Kaur, K.; Dietrich, C. Performance Analysis of Sensing-Based Semi-Persistent Scheduling in C-V2X Networks. arXiv 2018, arXiv:1804.10788. Available online: <https://arxiv.org/abs/1804.10788> (accessed on 1 December 2018)
- [42] Molina-Masegosa, R.; Gozalvez, J. LTE-V for Sidelink 5G V2X Vehicular Communications: A New 5G Technology for Short-Range Vehicle-to-Everything Communications. IEEE Veh. Technol. Mag. 2017, 12, 30–39.
- [43] 3GPP, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures (v14.3.0, Release 14),” 3GPP, Tech. Rep. 36.213, June 2017.
- [44] 3GPP, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Medium Access Control (MAC) protocol specification (v14.3.0, Release 14),” 3GPP, Tech. Rep. 36.321, June 2017.
- [45] 3GPP, “Study on enhancement of 3GPP support for 5G V2X services (v15.0.0, Release 15),” 3GPP, Tech. Rep. 22.886, Mar. 2017.
- [46] SAE International. Dedicated Short Range Communications (DSRC) Common Performance Requirements, SAE J2945, March 2016.
- [47] IEEE 1609 WG. IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) Security Services for Applications and Management Messages, IEEE Std 1609.2-2013, 2013.
- [48] IEEE 1609 WG. IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) Multi-channel Operation, IEEE Std 1609.4-2010, 2010.
- [49] IEEE 802.11 WG. Part 11: Wireless LAN Medium Access control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications, Amendment 6: Wireless Access in Vehicular Environments, IEEE Std 802.11p-2010, 2010.
- [50] J. Blum and Z. Eskandarian. The Threat of Intelligent Collisions. IEEE IT Pro, pages 24–29, Jan./Feb. 2004.
- [51] T. Leinmüller, R. K. Schmid, E. Schoch, A. Held, and G. Schaefer. Modeling Roadside Attacker Behavior in VANETs. In IEEE Globecom, 2008.
- [52] B. Parno and A. Perrig. Challenges in Securing Vehicular Networks. In ACM HotNets, 2005.
- [53] N. Bißmeyer, S. Mauthofer, K. M. Bayarou, and F. Kargl. Assessment of node trustworthiness in vanets using data plausibility checks with particle filters. In Vehicular Networking Conference (VNC), 2012.
- [54] R. K. Schmidt, T. Leinmüller, E. Schoch, A. Held, and G. Schaefer. Vehicle Behavior Analysis to Enhance Security in VANETs. In Proceedings of V2VCOM, 2008.
- [55] G. Yan, S. Olariu, and M. C. Weigle. Providing VANET security through active position detection. Computer Communications, 31(12):2883–2897, July 2008.
- [56] H. Stübgen, J. Firl, and S. A. Huss. A two-stage verification process for car-to-X mobility data based on path prediction and probabilistic maneuver recognition. In IEEE Vehicular Networking Conference, November 2011.
- [57] M. Raya, P. Papadimitratos, I. Aad, D. Jungels, and J.-P. Hubaux. Eviction of misbehaving and faulty nodes in vehicular networks. IEEE Journal on Selected Areas of Communications, 25:1557–1568, October 2007.
- [58] T. Leinmüller, R. Schmidt, , and A. Held. Cooperative Position Verification Defending Against Roadside Attackers 2.0. In Proceedings of 17th ITS World Congress, 2010.
- [59] H. J. LeBlanc, F. Hassan, E. Gomez, and N. Alsbou. Inter-vehicle communication assisted localization with resilience to false data injection attacks. In Proceedings of ACM CarSYS, 2016.
- [60] T. Leinmüller, E. Schoch, F. Kargl, , and C. Maihofer. Improved security in geographic ad hoc routing through autonomous position verification. In ACM VANET, 2006.

- [61] C. Garcia-Costa, E. Egea-Lopez, J. Tomas-Gabarron, J. Garcia-Haro, and Z. Haas. A Stochastic Model for Chain Collisions of Vehicles Equipped With Vehicular Communications. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 13(2):503–518, June 2012.
- [62] X. Y. Lu and S. E. Shladover. Automated truck platoon control, 2011.
- [63] S. Tsugawa. Results and issues of an automated truck platoon within the energy ITS project. In *Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pages 642–647, 2014.
- [64] J. Eckhardt. European truck platooning challenge 2016—creating next generation mobility. Storybook, The Hague, 2016.
- [65] O. Gehring and H. Fritz. Practical results of a longitudinal control concept for truck platooning with vehicle to vehicle communication. In *Proceedings of IEEE Conference on Intelligent Transportation System (ITSC)*, pages 117–122, 1997.
- [66] E. van Nunen N. van de Wouw J. Ploeg, B. Scheepers and H. Nijmeijer. Design and Experimental Evaluation of Cooperative Adaptive Cruise Control. In *Proceedings of IEEE ITSC*, 2011.
- [67] T. Kim and H. Kim. Vehicle-to-Vehicle Message Content Plausibility Check through Low-Power Beacons. In *Proceedings of IEEE 86th Vehicular Technology Conference: VTC2017-Fall*, 2017.
- [68] F. Okoro I. Simmons G. Couper P. Massie B. Smith C. Grover, I. Knight. Automated emergency brake systems: Technical requirements, costs and benefits (TRL Published Project Report PPR 227). Crowthorne: Transportation Research Library, 2008.
- [69] R. Rajamani. *Vehicle Dynamics and Control*. New York: Springer-Verlag, 2006.
- [70] P. Fernandes and U. Nunes. Platooning with IVC-enabled autonomous vehicles: Strategies to mitigate communication delays, improve safety and traffic flow. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 13, no. 1, pages 91–106, 2012.
- [71] O. Tonguz, N. Wisitpongphan, F. Bait, P. Mudaliget, and V. Sadekart. Broadcasting in vanet. In *Proc of 2007 Mobile Networks for Vehicular Environments (MOVE)*, pages 7–12, May 2007.
- [72] Q. Chen, D. Jiang, V. Taliwal, and L. Delgrossi. IEEE 802.11 based vehicular communication simulation design for NS-2. In *Proc. of the 3rd International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks (VANET)*, pages 50–56. ACM, 2006.
- [73] CAMP Vehicle Safety Communications Consortium. Vehicle safety communications project task 3 final report: Identify intelligent vehicle safety applications enabled by DSRC, Tech. Rep. DOT HS 809 859, March 2005.
- [74] R. Schmidt. Multiple emitter location and signal parameter estimation. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 34(3):276–280, Mar 1986.
- [75] R. Roy and T. Kailath. Esprit-estimation of signal parameters via rotational invariance techniques. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 37(7):984–995, Jul 1989.
- [76] A. Biswas, S. Lakshminpathi, and S. Sandhu. Channel estimation techniques with long training sequence for IEEE802.11A. In *Proc. of the International Conference on Signal Processing and Communications*, pages 136–139, Dec 2004.
- [77] B. Bloessl, M. Segata, C. Sommer, and F. Dressler. Towards an Open Source IEEE 802.11p stack: A full SDR-based transceiver in GNU Radio. In *Proc. of the IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*, pages 143–149, Dec 2013.
- [78] J. Xiong and K. Jamieson. SecureArray: Improving wifi security with fine-grained physical-layer information. In *Proc. of the 19th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom)*, pages 441–452, 2013.

뒷면지

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.