

군집 주행 서비스의 QoS 성능개선을 위한 SCI 정보 활용 자원 할당 알고리즘

SCI-Aided Resource Allocation to Improve QoS Performance of V2X Platooning Driving Service

남태식 · 전병철* · 조한신** · 육종관

Taesik Nam · Byeong-Cheol Jeon* · Han-Shin Jo** · Jong-Gwan Yook

요 약

V2X(vehicle-to-everything)가 지원하는 차량 시나리오 중 하나인 군집 주행은 C-ITS(cooperative-intelligent transportation systems)에서 교통 효율성을 향상시키는 주행 시나리오이다. 이러한 군집 주행 시나리오에는 군집 내 차량이 서로의 위치 및 속도 정보를 안정적으로 공유해야 한다. 그러나 교통상황이 혼잡해질수록 같은 군집 내 차량이 같은 자원을 점유하여 패킷이 충돌할 확률이 증가한다. 본 논문은 V2X의 군집 주행 시나리오, 특히 협력 적응형 순방향 제어(CACC: cooperative adaptive cruise control)시스템을 구축할 때 발생하는 통신 서비스 품질(QoS: quality of service) 열화 요인을 분석한다. 또한 CACC 시스템의 통신 QoS를 개선하기 위한 자원할당 알고리즘인 SCI aided CARA(SCI aided collision avoidance resource allocation) 알고리즘을 제안하였다. 본 연구는 최종적으로 알고리즘 적용을 통해 CACC 시스템을 운용 중인 군집 주행 차량의 향상된 통신 QoS 성능을 보인다.

Abstract

Vehicle-to-everything (V2X), which supports various vehicle scenarios, includes platooning as a key scenario in cooperative intelligent transport systems (C-ITS), aimed at enhancing the traffic efficiency. In platoon driving scenarios, it is crucial for vehicles within a platoon to share their location and speed information reliably. However, as traffic becomes more congested, the probability of packet collisions increases because vehicles in the same platoon occupy the same resources. This study analyzed the factors that lead to a decrease in the quality of service (QoS) in communications, particularly when implementing a cooperative adaptive cruise control (CACC) system in V2X platooning scenarios. Furthermore, we propose an SCI-aided collision avoidance resource allocation (SCI-aided CARA) algorithm to improve communication QoS in CACC systems. The application of this algorithm demonstrated an enhanced communication QoS performance in road environments with established CACC systems.

Key words: C-V2X Mode 4, NR-V2X Mode 2, SB-SPS, Resource Allocation, C-ITS

I. 서 론

자율주행 자동차 기술은 초기 단계의 경고 메시지 제

「이 논문은 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2022-0-01053, 다중 통신기술 네트워크 로드밸런싱 기술개발).」

연세대학교 전기전자공학과(Department of Electronic Engineering, Yonsei University)

*한밭대학교 전자제어공학과(Department of Electronic Engineering, Hanbat National University)

**한양대학교 미래자동차공학과(Department of Automotive Engineering, Hanyang University)

· Manuscript received November 28, 2023 ; Revised December 28, 2023 ; Accepted April 12, 2024. (ID No. 20231128-008S)

· Corresponding Author: Jong-Gwan Yook (e-mail: jgyook@yonsei.ac.kr)

공 시스템에서 출발해, 완전한 자율주행이라는 최종 목표를 향해 발전하고 있다. 이러한 완전 자율주행차량의 구현은 주변 차량, 기지국, 도로에 설치된 노변 기지국(RSU: road side unit) 등으로부터 인접 차량의 위치 및 속도 등의 정보를 수신받는 기술에 의해 구현된다. 이 과정은 V2X(vehicle-to-everything) 통신 기술이 핵심적인 역할을 하며, 3GPP(3rd generation partnership project)는 이 기술의 표준화를 진행 중이며, Release 14/15^[1]에서는 LTE 기반의 C-V2X(cellular V2X)를, Release 16부터는 5G 기반의 NR-V2X 통신 기술을 표준화하고 있다.

특히 완전자율주행을 위한 서비스는 차량 간 (V2V: vehicle-to-vehicle) 통신을 활용하며, V2V 통신을 안정적으로 활용하기 위한 기술로써 무선 자원을 효율적으로 사용하는 자원할당 알고리즘이 중요 기술로써 제시되었다. 이 중에서도 기지국 없이 SB-SPS(sensing-based semi-persistent scheduling)을 통해 독립적으로 무선 자원을 관리하는 무선 자원할당 알고리즘이 표준화되었으며, SB-SPS의 성능을 개선하여, C-V2X mode 4와 NR-V2X mode 2의 통신 서비스 품질(QoS: quality of service) 성능을 개선할 수 있는 연구^[2]가 활발하게 이뤄지고 있다.

3GPP는 V2X 서비스를 군집 주행, 센서 주행, 원격주행, 첨단주행의 네 가지 use case로 분류하고, 각 그룹에 대한 QoS 요구사항을 정의하였다. 완전 자율주행을 위해선 use case에서 운용되는 서비스의 안정성을 개선하는 연구는 필수적으로 수행되어야 한다. 본 연구는 이러한 use case 중 군집 주행 시나리오를 대상으로 분석을 시행하였으며, 특히 종방향 제어를 통해 차량간 간격을 유지하는 협력 적응형 순방향 제어 시스템(CACC: cooperative adaptive cruise control)^[3]을 구축할 때 발생하는 통신 QoS 열화 요인을 MAC(media access control) 계층 시뮬레이션을 통해 분석하고 이를 개선하기 위한 무선 자원할당 알고리즘을 제시한다.

II. V2X 군집 주행 시나리오 및 SB-SPS 알고리즘

2-1 V2X 군집 주행 시나리오

군집 주행(platooning driving) 시나리오는 각 차량이 물리적인 연결 없이 군집을 형성하여 이동하는 주행 시나

리오이다. 특히 군집 주행 서비스는 앞차와의 간격을 유지하며 주행하는 적응형 순방향 제어(ACC: adaptive cruise control)를 사용하여 주행한다.

이 시스템은 레이더나 카메라와 같은 센서를 사용하여 전방 차량의 속도 및 거리를 감지하고, 감지된 정보를 기반으로 자동차의 속도를 조절한다. ACC는 기본적으로 단독 차량에 대해서 안정적이고 편리한 서비스를 제공하는데 중점을 두고 있으며, 도로 교통량 개선 및 연료 소비 감소 등을 위한 관점에 있어서는 한계를 가진다.

이를 개선하기 위한 CACC^[3]는 센서뿐만 아니라, V2V 통신을 통해 전방 차량의 주행 정보를 실시간으로 공유받고, 공유된 정보를 토대로 차량 간 간격을 유지한다. CACC 서비스는 차량이 서로의 정보를 공유하면서 동시에 속도 및 방향을 제어한다는 점에 있어서 효율적이고 안정적인 군집 주행 서비스를 제공해 주는 시스템이다.

CACC 시스템^[4]의 주요 파라미터는 그림 1과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 v_i , q_i , u_i 는 각각 차량 i 의 속도, 위치, 가속도를 의미하며, l_i 는 차량 i 의 전장 길이를 의미한다. CACC 시스템은 차량 i 와 차량 $i-1$ 간 간격 d_i 이 차량 간 안전거리인 $d_{r,i}$ 를 만족하도록 동작한다. 초기에 제안된 CACC 시스템의 PD 제어기는 그림 2와 같은 블록 다이어그램으로 나타낼 수 있다.

$$u_{i-1,c}(t) = u_{i-1}(t - \theta_c) \quad (1)$$

여기서 차량 i 는 차량 $i-1$ 로부터 V2V 통신을 통해 가속도 $u_{i-1,c}$ 를 전달받는다. 하지만 전달받은 $u_{i-1,c}$ 는 V2V 통신 특성에 의해 θ_c 만큼 지연된 값을 전달받으며, 이는 통신 시스템의 QoS를 통해 결정된다.

3GPP TS 22.186^[5]은 각 use case의 서비스 운용을 위한

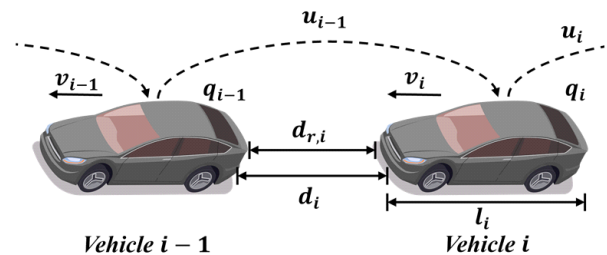


그림 1. 차량 간 간격 유지를 위한 CACC 시스템

Fig. 1. CACC system to maintain distance between vehicles.

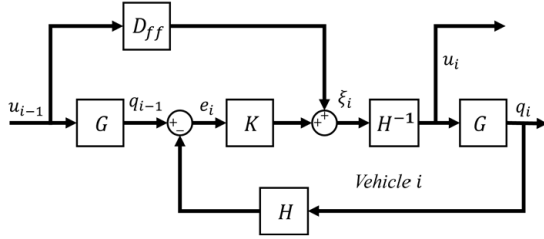


그림 2. CACC 제어 시스템의 블록다이어그램
Fig. 2. Block diagram of CACC control system.

QoS 요구사항을 기술하였으며, 군집 주행 서비스의 메시지 전송 주기는 20 ms를 요구하였다. 또한 선행 연구^[6]에 선 실증 도로 환경에서 ACC/CACC 시스템을 구축하고 통신 QoS에 의한 주행 서비스 안정성을 분석하였다. 해당 문헌에선 CACC 시스템을 위해 V2V 통신을 통해 전달받는 $u_{i-1,c}$ 의 정보가 패킷 충돌의 이유로 100 ms 안에 최신화되지 않으면 ACC로 전환되어 운용하였으며, 결과적으로 통신 QoS 성능에 따라 CACC 시스템의 동역학 제어 안정성이 달라짐을 기술하였다.

이와 같은 선행 연구의 요구사항과 결과들을 종합하였을 때 안정적인 CACC 시스템을 제공하기 위해서는 센서의 정확도 및 제어기의 정밀도를 개선하는 것뿐만 아니라, V2V 통신 QoS 성능을 개선하여 θ_c 를 줄이는 것도 중요한 이슈로써 제시된다.

2-2 Sensing-Based Semi Persistent Scheduling (SB-SPS)

차량의 V2V 통신을 위한 무선 자원할당 방법은 3GPP에서 표준화한 알고리즘인 SB-SPS를 통해 자원을 할당하고 단말 간 통신으로 메시지를 전송한다. SB-SPS는 그림 3과 같이 센싱 윈도우(sensing window)의 서브 채널에서 수집되는 전력량을 감지한 뒤, 수신 감도가 약한 20 %의 서브 채널에서 자원을 무작위로 선택하는 무선 자원할당 알고리즘이다. 하지만 도로 환경이 혼잡한 경우, 군집 내 차량끼리 같은 자원을 할당하여 패킷이 충돌할 가능성이 커지게 되고, 통신 QoS 성능을 저하시킨다.

차량 간 패킷 충돌 시나리오는 주로 동시접속 충돌(SAC: simultaneous access collision)에 의해 발생한다. 반이중 통신 방식의 특성상 발생하는 SAC는 주행 정보를 송신하고 수신받는 차량이 서로 같은 자원을 사용할 때

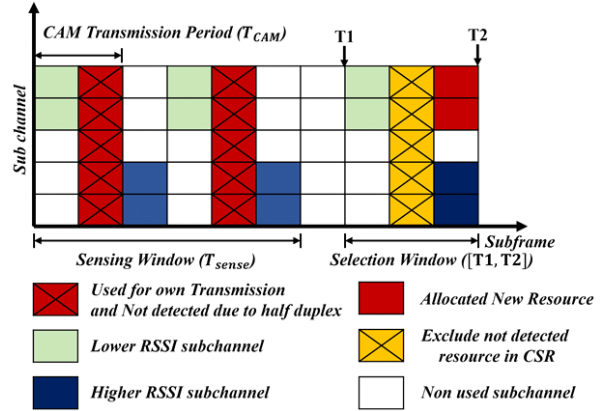


그림 3. SB-SPS를 통한 무선 자원할당
Fig. 3. Resource allocation with SB-SPS.

발생하며 이 문제는 차량 밀도가 혼잡할 때 심화된다.

이러한 시나리오에 의한 패킷 충돌 가능성은 SB-SPS를 통해 감소시킬 수 있다. 하지만 주요 통신 대상이 같은 차선을 공유하는 차량으로 정해져 있고 주행 정보 메시지를 주기적으로 전송하는 군집 주행 서비스에서 기존 SB-SPS 알고리즘만으로 충돌을 온전히 회피할 수 없다.

그림 4는 군집 주행 서비스를 운용할 때 발생하는 패킷 충돌 시나리오를 도식화한 결과이다. 그림 4와 군집 주행 서비스의 리더 차량이 군집 주행 메시지를 전송할 때 군집 멤버(platoon member) 1, 2 차량은 정상적으로 군집 리더(platoon leader)로부터 메시지를 전송받았으나, 군집 멤버 3 차량은 SAC로 인해 패킷 충돌이 발생하게 된다.

이에 더하여 주기적 협력 인식 메시지(CAM: cooperative awareness message)^[7]의 전송 주기는 100 ms인 반면 군집 내 주행 정보 공유는 동역학 제어 및 서비스 안

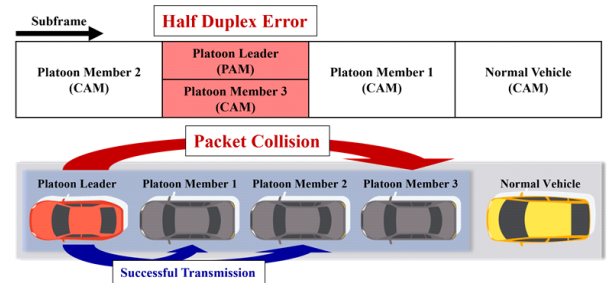


그림 4. 군집 주행 서비스의 패킷 충돌 시나리오
Fig. 4. Packet collision scenario in platooning service.

정성의 이유로 20 ms^{[4]~[6]}의 전송 주기를 가진다. 이는 SB-SPS를 통해 자원을 선택하는 셀렉션 윈도우(selection window)도 100 ms에서 20 ms로 좁아져 CSR(candidate single sub-frame resource)도 작아지게 된다. 이는 무선통신 채널의 혼잡을 일으키며, SAC의 발생 확률을 증가시킨다.

본 연구는 이러한 SAC 패킷 충돌을 최소화하기 위해 주행 정보 메시지와 같이 전송되는 SCI(sidelink control information) 정보를 활용한 무선 자원할당 알고리즘에 대해서 제안하고 이에 따른 통신 QoS 성능개선 결과를 제시한다.

III. SCI Aided Collision Avoidance Resource Allocation

제안하는 SCI aided CARA(SCI aided collision avoidance resource allocation)는 PSCCH(physical sidelink control channel)를 통해 전송되는 SCI 메시지를 활용한다.

3-1 SCI 메시지 포맷

SCI는 총 2-stage에 나누어 전송되며, 그림 5와 같은 포맷을 가진 1-stage SCI는 실제 주행 정보를 담고 있는 전송 블록(TB: transport block)을 디코딩하기 위한 정보를 제공한다^[8]. 이에 따라 1-stage SCI는 안정적인 전송을 목표로 하며 디코딩은 낮은 SINR(signal to interference plus noise ratio) 요구사항을 가진다. 따라서 각 차량은 1-stage SCI의 frequency resource location 정보를 통해 차량의 자원 상태와 예약 여부를 통해 자원 현황을 모니터링할 수 있다.

3-2 Proposed Resource Allocation Algorithm

본 논문은 1-stage SCI가 제공해 주는 정보를 활용하여 수행하는 SCI aided CARA 알고리즘을 제안한다. 그림 6

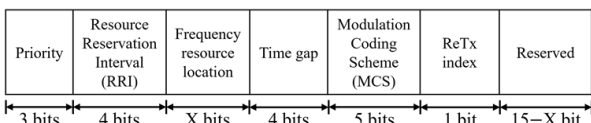


그림 5. 1-stage SCI 메시지 포맷
Fig. 5. 1-stage SCI message format.

은 기존 SB-SPS 알고리즘에서 SCI aided CARA가 추가되면서 변형된 블록다이어그램을 음영으로 표시한 결과다.

여기서 PV_i 는 후방에 있는 군집 차량에 군집 주행 정보 메시지(PAM: platoon awareness message)를 전달하는 차량이다. RC(reselection counter)는 SPS를 통해 할당된 자원이 활용되는 횟수를 의미하고 새로운 메시지를 전송할 때마다 1씩 차감된다. 만약 RC가 0이 된다면, 이후 새로운 RC를 할당하고 자원을 유지할지, 새로운 자원을 선택할지를 결정한다. 최종적으로 군집 차량의 RC가 0이 되고 새로운 자원을 선택하는 경우, 그림 7과 같은 본 연구에서 제안하는 SCI aided CARA 알고리즘이 수행된다.

자원할당 알고리즘은 표준화된 SB-SPS 알고리즘과 유사한 형태로 전개되나, 선행 연구^[9]에서 제안하는 수정된 CSR 생성 방식을 사용한다. 선행 연구^[9]에서 개발한 System-level 시뮬레이터에서는 분산 혼잡 제어(DCC: distributed congestion control)에 의해 주기적 협력 인식 메시지(CAM)의 전송 주기가 가변적인 상황을 고려하며 예약된 자원도 CSR에 포함될 수 있다. 이는 군집 차량 간 패킷 충돌을 초래할 수 있으나, 본 연구에서 제안하는 SCI

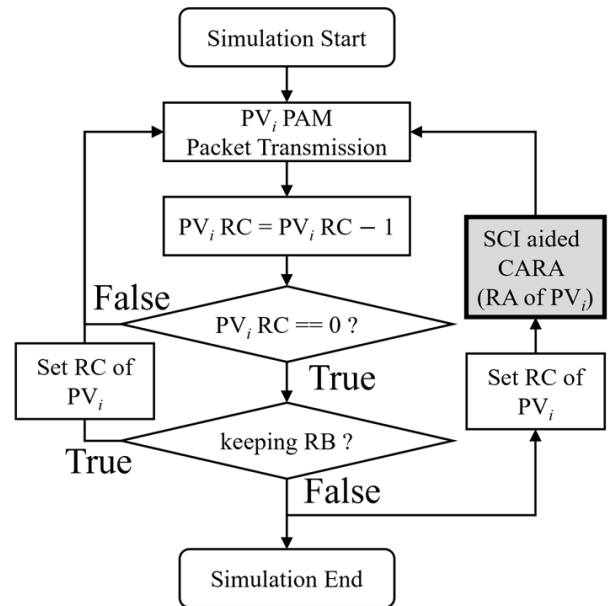


그림 6. SCI aided CARA 적용을 위해 수정된 SB-SPS 과정
Fig. 6. SB-SPS process modified to apply SCI aided CARA.

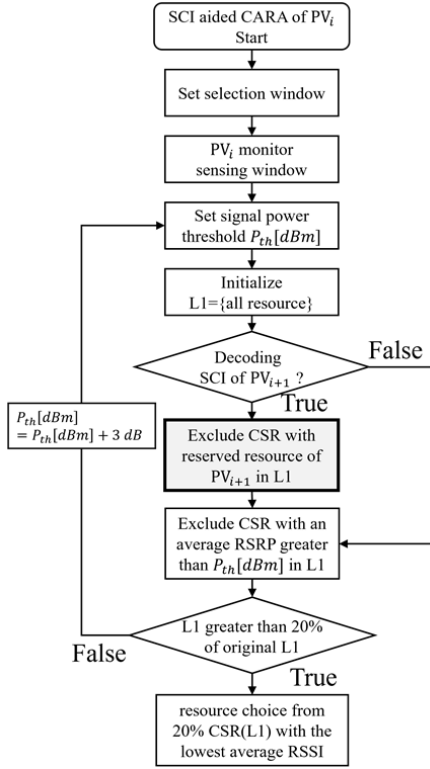


그림 7. 제안된 SCI-aided CARA의 블록다이어그램
Fig. 7. Block diagram of the proposed SCI-aided CARA.

aided CARA 알고리즘은 음영 처리된 블록과 같이 군집 차량 PV_i 가 무선 자원할당 알고리즘을 수행할 때 자신의 가속도 정보 혹은 군집 주행 정보를 수신받는 차량 PV_{i+1} 의 1-stage SCI가 디코딩되었다면 현재 PV_{i+1} 이 점유 중인 자원을 CSR L1 list에서 배제하게 된다. 이를 통해 통신 대상 차량이 점유 중인 자원을 미리 파악하고 충돌을 회피할 수 있으며, PAM 전송의 안정성을 개선할 수 있다.

IV. 시뮬레이션 결과

4.1 시뮬레이션 파라미터

시뮬레이션은 선행 연구^[9]에서 개발한 System-level 시뮬레이터 WiLabV2Xsim을 활용하여 진행하였다. CACC 정보교환 시나리오의 주요 시뮬레이션 파라미터^{[6],[10]}는 표 1과 같으며 3GPP에서 제안하는 ETSI Highway 도로 환

경에서 진행되었다.

시뮬레이션의 차량 밀도는 1 km당 [100, 125, 150]대의 차량($\rho = 100, 125, 150$)이 분포되도록 설정하였으며, 군집 리더(platoon leader) 차량 1대 군집 멤버(platoon member) 차량 4대로 설정하였다.

CACC 정보교환 시나리오는 통신 방식에 따라 2개의 시나리오에 대해서 수행하였으며, 그림 8에 이를 도식화하였다. 그림 8(a)의 시나리오 A는 군집 리더를 통해 주행 정보를 획득하여 CACC 시스템을 운용하는 시나리오이며, 그림 8(b)의 시나리오 B는 전방 차량과의 V2V 통신을 통해 주행 정보를 획득하여 CACC 시스템을 운용하는 시나리오이다.

4.2 시뮬레이션 결과

군집 주행 시나리오의 성능 분석은 패킷 전송 성공 비율인 PDR(packet delivery ratio)와 IPG(Inter-packet gap)를 사용하여 분석하였다. PDR은 군집 차량 간 통신을 통해 전송한 패킷 중 성공적으로 수신된 패킷의 비율로 계산되며, IPG는 성공한 패킷 간의 시간지연을 의미한다. 여기서 IPG는 본 연구에서 다루는 CACC 시스템의 안정성과 성능을 결정하는 주요 지표로써 식 (1)의 θ_c 을 결정한다.

표 1. CACC 정보교환 시나리오 주요 파라미터
Table 1. CACC information exchange scenario parameters.

Name		Normal vehicle	Platoon vehicle
Message	Packet name	CAM	PAM
	Payload size	300 Byte	500 Byte
	Transmission rate	10 Hz	50 Hz
	MCS	3	5
Vehicle density (ρ)		[100, 125, 150] vehicle/km	
Inter-vehicle spacing		-	11.7 m ($T_{gap} \times v$)
Tx-Rx distance			20 m
Inter-lane spacing		3 m	
Safety time gap (T_{gap})		-	0.6 s
Vehicle speed (v)		70 km/h	
Resource selection window		[1, 100] ms	[1, 20] ms

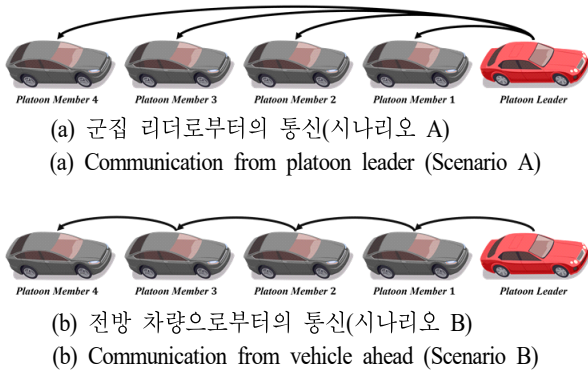


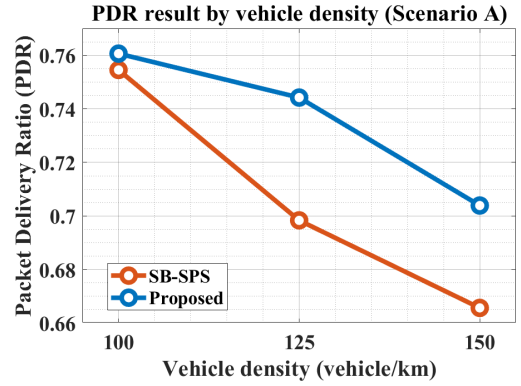
그림 8. CACC 기반 군집 주행을 위한 통신 시나리오
Fig. 8. Communication scenario for CACC-based platoon driving.

4-2-1 시나리오별 CACC 서비스 PDR 결과

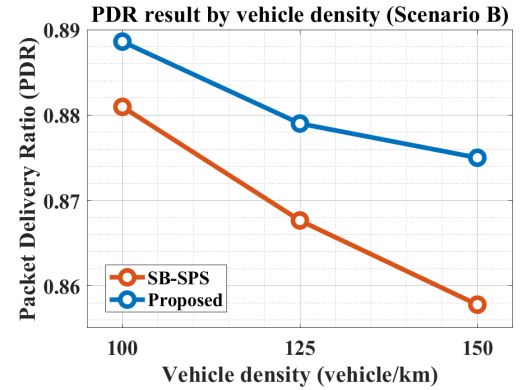
그림 9는 각각 시나리오 A/B에서 SCI aided CARA를 수행한 결과이며, 그림 9(a)는 시나리오 A에 대해서 군집 리더가 군집 멤버에게 전송한 패킷에 대한 평균 PDR 결과이다. 그림 9(b)는 시나리오 B와 같이 바로 앞 차량으로부터 수신받은 패킷에 대한 평균 PDR 결과이다. 시나리오 A/B 모두 전통적인 SB-SPS 방법과 비교하여 제안한 SCI aided CARA 알고리즘을 적용하였을 때 PDR이 개선됨을 보인다. 시나리오 A는 차량 밀도(ρ) 100과 같이 작을 때는 1 % 미만의 개선도를 보이지만, 차량 밀도(ρ)가 125, 150일 때 각각 4.6 %, 3.8 %의 PDR 개선이 확인된다. 시나리오 B는 차량 밀도(ρ)가 100, 125일 때 1 % 미만의 개선도를 보이나 차량 밀도(ρ) 150일 때 1.8 %의 PDR 개선이 확인된다. 결과적으로 두 시나리오 모두 전통적인 SB-SPS 적용 결과와 비교하여 제안한 SCI-aided CARA 알고리즘이 PDR을 개선할 수 있음을 확인하였으며, 특히 차량 밀도가 혼잡해질 때 PDR 성능 개선이 커짐이 확인된다.

4-2-2 시나리오별 CACC 서비스 IPG(θ_c) 결과

그림 10은 각각 시나리오 A/B에서 SCI aided CARA를 수행한 결과이며, 그림 10(a)는 시나리오 A에 대해서 군집 리더가 군집 멤버에게 전송한 패킷에 대한 IPG를 CDF로 표현한 결과이다. 그림 10(b)는 시나리오 B와 같이 바로 앞 차량으로부터 수신받은 패킷에 대한 IPG를 CDF로



(a) 시나리오 A CACC 서비스 패킷 평균 PDR
(a) CACC service packet PDR in Scenario A



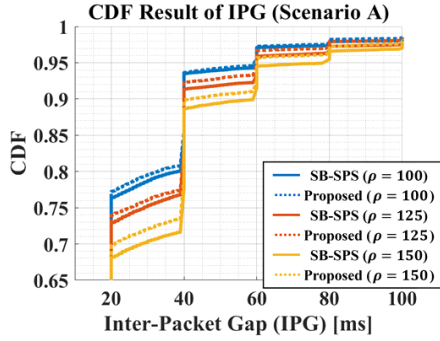
(b) 시나리오 B CACC 서비스 패킷 평균 PDR
(b) CACC service packet PDR in Scenario B

그림 9. 시나리오 A/B의 CACC 서비스 패킷 평균 PDR
Fig. 9. CACC service packets average PDR for Scenario A/B.

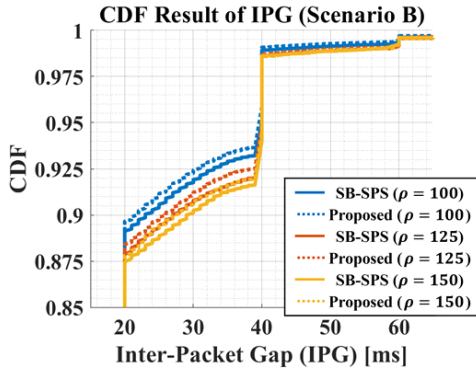
표현한 결과이다. 시나리오 A/B 모두 전통적인 SB-SPS 방법과 비교하여 성능을 분석하였으며, 두 시나리오 모두 미미하지만 IPG(θ_c) 측면에서 개선된 것을 확인할 수 있었다.

V. 결 론

본 논문에서는 PSCCH를 통해 전송되는 1-stage SCI를 활용하여 같은 군집 내 차량의 자원 정보를 모니터링하고, 이를 통해 충돌을 회피하여 CACC 시스템 안정성을 높이는 자원할당 알고리즘을 제안하였다. 그리고 MAC 계층 시뮬레이션을 통해 제안한 기술이 V2V 통신 PDR을



(a) 시나리오 A CACC 서비스 패킷 IPG
(a) CACC service packet IPG in Scenario A



(b) 시나리오 B CACC 서비스 패킷 IPG
(b) CACC service packet IPG in Scenario B

그림 10. 시나리오 A/B의 CACC 서비스 패킷 IPG 결과
Fig. 10. CACC service packet IPG results for Scenario A/B.

개선할 수 있음을 확인하였다.

주요 성능 지표인 PDR과 IPG, 즉 전송 신뢰도와 패킷 간 지연 시간은 차량 간 충돌 회피 혹은 CACC와 같은 특정 서비스의 안정성을 결정짓는 매우 중요한 성능 척도이다. 따라서 도로 위 차량이 혼잡한 교통상황에서도 높은 통신 신뢰도와 낮은 지연 시간을 보장하는 것은 중요하며, 이는 식 (1)의 θ_c 를 최소화함으로써 CACC 서비스의 동역학 제어 안정성을 가져갈 수 있음을 의미한다. 이런 관점에서 제안한 SCI aided CARA 알고리즘이 SB-SPS 알고리즘과 비교하여 높은 PDR과 IPG 성능개선을 보임으로써 안정적인 서비스 제공에 적합함을 보인다.

최종적으로 SCI는 군집 주행 차량뿐만 아니라, 자율주행차량이 주변 차량의 자원 정보를 인지하는 데 있어서 필수 정보이다. 본 논문은 군집 주행 서비스에 이를 활용

하여 CACC 시스템을 위한 V2V 통신 성능개선에 활용하였다. 추후 본 연구의 결과를 활용하여 SCI를 활용한 지역적 자원 정보를 모니터링하고, 이를 활용하는 개선된 무선 자원할당 알고리즘을 개발에 적용이 가능할 것으로 기대된다.

References

- [1] *Evolved Universal Terrestrial Radio Access(E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN): Overall Description: Stage 2*, 3GPP TR 36.300, 2017.
- [2] J. Y. Choi, H. S. Jo, C. Mun, and J. G. Yook, "Deep reinforcement learning-based distributed congestion control in cellular V2X Networks," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 10, no. 11, pp. 2582-2586, Aug. 2021.
- [3] X. Y. Lu, S. Shladover, "Truck CACC system design and DSRC messages," California Partners for Advanced Transportation Technology, DTFH61-13-H00012, Feb. 2018.
- [4] H. Xing, J. Ploeg, and H. Nijmeijer, "Compensation of communication delays in a cooperative ACC system," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 69, no. 2, pp. 1177-1189, Feb. 2019.
- [5] *Enhancement of 3GPP Support for V2X Scenarios: Stage 1*, 3GPP TS 22.186, Sep. 2017.
- [6] H. Xing, B. Cimoli, I. Passchier, G. Kakes, V. Ho, and H. Nijmeijer, "Practical challenges in CACC communication: ITS G5, LTE uu, and LTE sidelinkPC5," in *2021 European Control Conference(ECC)*, Delft, Jun.-Jul. 2021, pp. 1795-1801.
- [7] M. Rafael, J. Gozalvez, and M. Sepulcre, "Comparison of IEEE 802.11 p and LTE-V2X: An evaluation with periodic and aperiodic messages of constant and variable size," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 121526-121548, Jul. 2020.
- [8] *Evolved Universal Terrestrial Radio Access(E-UTRA): Physical Layer Procedures*, 3GPP TR 36.213, Oct. 2018.
- [9] V. Todisco, S. Bartoletti, C. Campolo, A. Molinaro, A.

O. Berthet, and A. Bazzi, "Performance analysis of sidelink 5G-V2X mode 2 through an open-source simulator," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 145648-145661, 2021.

[10] *Study Enhancement 3GPP Support for 5G V2X Services*, 3GPP TR 22.886, Dec. 2018.

남 태 식 [연세대학교/석·박사 통합과정]

<https://orcid.org/0000-0002-6113-2475>



2020년 2월: 한밭대학교 전자제어공학과 (공학사)

2020년 2월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 석·박사 통합과정

[주 관심분야] 기계학습, 정보복원, 신호처리, 무선통신, 자율주행차량 등

조 한 신 [한양대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-5738-1807>



2001년 8월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학사)

2004년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)

2009년 8월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학박사)

2009년 10월: University of Texas at Austin, Postdoctoral Fellow

2011년 11월: 삼성전자 네트워크사업부 책임연구원

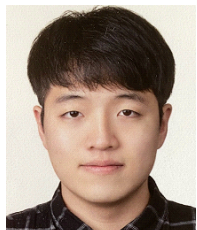
2012년 3월~2023년 8월: 한밭대학교 전자·제어공학과 교수

2023년 9월~현재: 한양대학교 미래자동차공학과 교수

[주 관심분야] 이기종 무선네트워크, 무선통신 시스템간의 주파수 공유 및 양립성, MIMO 시스템, 펄스셀 및 소형셀 네트워크, 확률기하이론

전 병 철 [한밭대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0009-0005-7445-4739>



2022년 2월: 한밭대학교 전자제어공학과 (공학사)

2022년 2월~현재: 한밭대학교 전자제어공학과 석사과정

[주 관심분야] 기계학습, 정보복원, 신호처리, 무선통신, 자율주행차량 등

육 중 관 [연세대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0001-6711-289X>



1987년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)

1989년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)

1996년 12월: University of Michigan 전기전자공학과 (공학박사)

1997년 1월~1998년 9월: University of Michigan Research Fellow

1998년 1월~1999년 2월: Qualcomm Inc. Senior Engineer

1999년 3월~2000년 2월: 광주과학기술원 조교수

2000년 3월~현재: 연세대학교 전자공학과 교수

2012년~2013년: IEEE Distinguished Lecturer (EMC Society)

[주 관심분야] 마이크로파 시스템 해석 및 설계, 안테나 시스템, RF MEMS, Bio-Radar and Sensors, Computational Electromagnetics, EMI/EMC, HEMP, TEMPEST