JKSCI

한국컴퓨터정보학회논문지
Journal of The Korea Society of Computer and Information
Vol. 31 No. 11, pp. 241-255, November 2026
https://doi.org/10.9708/jksci.2026.31.11.241

AODV Route Discovery Control Scheme Using Local Channel Busy Percentage for Improved Packet Delivery Ratio in VANETs

Jonghyeon Choe*, Seungwoo Lee*, Youngboo Kim**, Seungmin Oh***

*Student, Dept. of Computer Engineering, Kongju National University, Cheonan, Korea
**Post-doctoral Researcher, Dept. of Computer Engineering, Kongju National University, Cheonan, Korea
***Professor, Dept. of Computer Engineering, Kongju National University, Cheonan, Korea

[Abstract]

Conventional AODV does not account for channel utilization in route discovery at intermediate nodes. This paper proposes CBP-AODV, a method that controls new RREQ initiation and RREP generation at intermediate vehicle nodes using local Channel Busy Percentage (CBP). The CBP distribution for each control target is divided into four intervals, and interval membership is added to the existing AODV conditions. If the CBP condition prevents RREP generation, forwarding of the received RREQ also terminates. The CBP measurement function defined in IEEE 802.11bd is implemented in an IEEE 802.11p-based model. Twelve configurations are compared across nine scenarios combining vehicle counts and configured maximum speeds. PDR is defined as the percentage of Ping requests whose corresponding replies reach the source. With ten destinations and five random seeds per scenario, applying the highest CBP interval from each distribution to both decision points yields the highest PDR averaged across all scenarios, 61.11%, exceeding conventional AODV by 21.68 percentage points. CBP-AODV also reduces the reception failure rate of Ping messages at the physical layer, contributing to the improvement in PDR.

▸ **Key words**: VANET, CBP-AODV, Channel Busy Percentage (CBP), RREQ Control, RREP Control

[요 약]

기존 AODV는 중간 차량 노드의 경로 탐색에 채널 사용 상태를 반영하지 않는다. 본 논문은 차량별 채널 사용률(CBP)에 따라 중간 차량 노드의 새로운 RREQ 시작과 RREP 생성을 제어하는 CBP-AODV를 제안한다. 두 제어 대상의 CBP 분포를 각각 네 구간으로 나누고, 기존 AODV 조건에 구간 포함 여부를 추가한다. CBP 조건으로 RREP 생성이 불허되면 수신 RREQ 전달도 종료한다. IEEE 802.11p 기반 모델에 IEEE 802.11bd의 CBP 측정 기능을 구현하여 차량 수와 설정 최대 속력을 조합한 9개 시나리오에서 12개 설정을 비교하였다. PDR은 Ping 요청 중 대응 응답이 출발지에 도달한 비율이다. 시나리오별 목적지 차량 10대와 시드 1~5를 조합한 결과, 두 판단에 각 분포의 가장 높은 CBP 구간을 함께 적용한 설정에서 전체 시나리오 평균 PDR이 61.11%로 가장 높았으며, 기존 AODV보다 21.68%p 높았다. 또한 물리계층에서 Ping 메시지의 수신 실패율을 낮추어 PDR 향상에 기여하였다.

▸ **주제어**: 차량용 애드혹 네트워크, CBP-AODV, 채널 사용률, 경로 탐색, RREQ 제어, RREP 제어

• First Author: Jonghyeon Choe, Corresponding Author: Seungmin Oh
*Jonghyeon Choe (whdgus1323@smail.kongju.ac.kr), Dept. of Computer Engineering, Kongju National University
*Seungwoo Lee (lsw8494@gmail.com), Dept. of Computer Engineering, Kongju National University
**Youngboo Kim (0bookim@kongju.ac.kr), Dept. of Computer Engineering, Kongju National University
***Seungmin Oh (smoh@kongju.ac.kr), Dept. of Computer Engineering, Kongju National University
• Received: 2026. 09. 21, Revised: 2026. 10. 16, Accepted: 2026. 11. 06.

Copyright © 2026 The Korea Society of Computer and Information
http://www.ksci.re.kr pISSN:1598-849X | eISSN:2383-9945
www.kci.go.kr

I. Introduction

차량 애드혹 네트워크(Vehicular Ad Hoc Network, VANET)는 도로 위험 정보의 공유, 교통 흐름 관리, 도로 상태 및 서비스 정보의 제공 등 다양한 지능형 교통 서비스에 활용된다. 이러한 서비스에서는 차량이 필요한 정보를 수신하여 활용할 수 있어야 하므로, 데이터 패킷의 손실과 전달 지연은 통신 성능의 중요한 문제가 된다. 특히 여러 차량이 같은 무선 채널을 이용하여 정보를 교환하는 환경에서는 차량의 통신 수요와 채널 접근 경쟁을 함께 고려해야 한다. 따라서 차량 통신을 활용하는 서비스를 지원하기 위해서는 데이터 패킷을 안정적으로 전달하기 위한 통신 기법이 필요하다.

VANET은 차량 노드 간 무선 통신을 이용하여 정보를 교환하는 네트워크이다. 출발지 차량 노드와 목적지 차량 노드가 직접 통신할 수 없는 경우에는 중간 차량 노드가 데이터 패킷을 전달하여 통신을 지원할 수 있다. 이때 출발지 차량 노드의 데이터 패킷이 목적지 차량 노드에 도달하려면 중간 차량 노드를 거치는 라우팅 경로가 필요하다.

VANET에서는 차량의 이동으로 이웃 차량 노드와 무선 링크의 연결 상태가 달라지므로, 데이터 패킷을 전달하던 라우팅 경로를 계속 사용할 수 없는 상황이 발생한다. 따라서 라우팅 프로토콜은 목적지 차량 노드까지 이용 가능한 라우팅 경로를 구성하고, 기존 라우팅 경로를 사용할 수 없을 때 새로운 라우팅 경로를 확보할 수 있어야 한다. 차량 이동에 따른 라우팅 경로의 변화는 VANET의 데이터 전달 성능에 영향을 주는 주요 요인이다.

AODV(Ad hoc On-Demand Distance Vector)는 데이터 패킷을 전달할 라우팅 경로가 필요할 때 라우팅 경로를 탐색하는 라우팅 프로토콜이다 [1]. 출발지 차량 노드는 목적지 차량 노드까지 이용 가능한 라우팅 경로가 없으면 경로 요청 메시지(Route Request, RREQ)를 전파한다. 목적지 차량 노드 또는 기존 응답 조건을 충족한 중간 차량 노드는 경로 응답 메시지(Route Reply, RREP)를 생성한다. RREQ 출발지 차량 노드는 수신한 RREP의 정보를 이용하여 목적지 차량 노드까지의 라우팅 경로를 구성한다.

중간 차량 노드는 AODV의 라우팅 경로 탐색 과정에서 새로운 RREQ를 시작하거나 보유한 라우팅 경로를 이용하여 RREP를 생성할 수 있다. 본 실험에서 사용한 AODV 구현에서 중간 차량 노드는 전달할 데이터 패킷의 목적지 차량 노드까지 이용 가능한 라우팅 경로가 없으면 새로운 RREQ의 시작 여부를 판단한다. 또한 RREQ를 수신한 중간 차량 노드는 목적지 차량 노드까지의 유효한 라우팅 경로를 보유하고 기존 RREP 생성 조건을 충족하면, 해당 라우팅 경로의 정보를 포함한 RREP를 생성할 수 있다. 새로운 RREQ 시작은 라우팅 경로의 탐색을 시작하는 동작이며, RREP 생성은 이미 보유한 라우팅 경로의 정보를 RREQ 출발지 차량 노드에 제공하는 동작이다.

그러나 기존 AODV는 중간 차량 노드가 새로운 RREQ의 시작 여부와 RREP의 생성 여부를 결정할 때 해당 중간 차량 노드가 관측한 채널 사용 상태를 직접 반영하지 않는다. 중간 차량 노드가 새로운 RREQ를 시작하면 주변 차량 노드에서 RREQ 전달이 이어지면서 다른 패킷의 채널 접근 경쟁이 증가할 수 있다. 또한 중간 차량 노드가 생성한 RREP의 라우팅 경로 정보를 RREQ 출발지 차량 노드가 이용하면, 이후 데이터 패킷은 해당 중간 차량 노드를 거쳐 전달된다. 따라서 중간 차량 노드 주변의 채널 사용 상태는 추가적인 RREQ 전송뿐 아니라, RREP가 제공한 라우팅 경로를 통한 데이터 패킷 전달에도 관련된다.

이러한 문제를 해결하기 위해 채널 사용률이 높은 중간 차량 노드의 RREQ 시작과 RREP 생성을 일괄적으로 제한하는 것은 적절하지 않을 수 있다. 해당 중간 차량 노드의 라우팅 제어 패킷 전송은 줄일 수 있지만, 목적지 차량 노드까지의 라우팅 경로를 탐색하거나 보유한 라우팅 경로의 정보를 제공할 기회도 제한되기 때문이다. 또한 높은 채널 사용률에는 데이터 패킷의 송수신 활동도 포함될 수 있으므로, 높은 값만으로 해당 중간 차량 노드를 거치는 라우팅 경로가 데이터 전달에 부적합하다고 판단하기 어렵다. 따라서 어떤 채널 사용 상태에서 중간 차량 노드의 RREQ 시작과 RREP 생성을 허용하는 것이 전달 성능에 유리한지 확인할 필요가 있다.

본 연구는 중간 차량 노드가 측정한 채널 사용률(Channel Busy Percentage, CBP)을 이용하여 새로운 RREQ 시작과 RREP 생성을 제어하는 CBP-AODV를 제안한다. CBP는 측정 기간 중 채널이 busy 상태인 시간의 백분율이며, 각 차량 노드가 측정한 값을 local CBP라고 한다 [2]. CBP-AODV는 기존 AODV 조건에 local CBP가 선택한 구간에 포함되어야 한다는 조건을 추가한다. local CBP 조건을 적용받는 중간 차량 노드는 해당 조건을 충족하지 못하면 새로운 RREQ를 시작하지 않으며, RREP 생성에 해당 조건을 적용하는 경우에는 RREP를 생성하지 않고 수신한 RREQ도 전달하지 않는다. RREQ 시작 제어와 RREP 생성 제어의 개별 적용 및 결합 적용에 각각 네 CBP 구간을 적용하여, 제어 대상과 CBP 구간에 따른 패킷 전달 성능을 비교한다. 성능 평가는 IEEE 802.11p 기반 통신 모델에 IEEE 802.11bd의 CBP 측정 기능을 구현

www.kci.go.kr

한 환경에서 수행하며, PDR과 물리계층에서 Ping 메시지의 수신 실패율을 분석한다.

제II장은 관련 연구를 설명한다. 제III장은 CBP-AODV의 설계 근거와 local CBP 기반 제어 구성을 제시하고, 제IV장은 기존 AODV 처리 과정에 제어 조건을 적용하는 방법을 통합 순서도로 설명한다. 제V장은 실험 설계와 평가 방법을, 제VI장은 실험 결과와 그 해석을 제시한다. 제VII장은 결론과 향후 연구를 정리한다.

II. Related Work

VANET/V2X에서는 차량의 이동과 공유 무선 채널의 사용 상태를 라우팅 및 메시지 전송에 반영하는 연구가 수행되었다. 이 장에서는 선행연구를 AODV 개선, 채널 상태 기반 전송 제어와 부하 평가, IEEE 802.11p/bd 분석으로 구분하고, 각 연구가 사용하는 정보, 변경하는 프로토콜 동작, 평가하는 성능을 비교한다.

1. AODV Routing in VANETs and V2X Networks

Chatterjee 등은 VANET/V2X 라우팅을 학습 기반 방식과 비학습 기반 방식으로 구분하고, AODV를 비학습 기반 반응형 라우팅 프로토콜로 분류하였다 [3]. El-Dalahmeh 등은 동일한 암호화 방식을 적용한 AODV, OLSR 및 DSDV의 패킷 전달 성능과 라우팅 오버헤드를 비교하였다 [4]. 이들 연구는 AODV의 분류와 프로토콜 간 성능 차이를 다루었다.

AODV의 동작을 개선하는 연구에서는 차량 이동 정보와 링크 품질을 활용하였다. Darabkh 등은 차량의 속력과 이동 방향을 라우팅 경로 구성에 반영하고, 속력에 따라 HELLO 메시지의 전송 주기를 조절하였다 [5]. Al-Qassas와 Qasaimeh는 예상 전송 횟수(ETX, Expected Transmission Count)를 사용하는 AODV 변형들을 비교하여 링크 품질을 라우팅 경로 선택에 활용했을 때의 성능을 평가하였다 [6]. 본 연구에서는 중간 차량 노드가 자신이 관측한 채널 사용 상태를 이용하여 새로운 RREQ의 시작 여부와 RREP의 생성 여부를 결정한다.

2. Channel-Aware V2X Transmission Control and Load Assessment

채널 상태 기반 V2X 전송 제어는 차량이 관측한 무선 환경에 따라 전송 매개변수를 조절한다. Balador 등은 분산 혼잡 제어(DCC, Decentralized Congestion Control) 연구를 검토하고, 메시지 전송률, 전송 전력 및 데이터 전송률을 조절하는 방법을 정리하였다 [7]. Cho 등은 수신 신호 강도를 이용하여 패킷 손실이 페이딩과 채널 혼잡 중 어느 상태와 관련되는지 판단하고, 데이터 전송률과 전송 전력을 조절하였다 [8]. St. Amour와 Jaekel은 채널 사용 비율(CBR, Channel Busy Ratio)에 따라 전송 상태를 변경하고, 각 상태에 대응하는 기본 안전 메시지(BSM, Basic Safety Message)의 데이터 전송률을 선택하였다 [9]. 문헌 [10]은 CBR에 따라 IEEE 802.11bd 패킷의 반복 전송 횟수를 조절하였다. 이들 연구는 채널 상태를 메시지 전송률, 데이터 전송률, 송신 전력 또는 반복 전송 횟수의 결정에 사용한다.

관측한 채널 상태를 전송 제어 대신 부하 평가에 사용하는 연구도 있다. Wippelhauser 등은 실제 교통량 자료를 이용한 ITS-G5 시뮬레이션에서 도로변 ITS 스테이션과 차량 ITS 스테이션이 측정한 평균 CBR을 구분하여 채널 부하를 분석하였다 [11]. 이는 관측 주체별 채널 부하를 평가한 연구로, 채널 상태에 따라 라우팅 제어 메시지의 생성 여부를 결정하는 연구와 분석 대상이 다르다.

기존 연구가 차량의 이동 정보와 링크 품질을 경로 구성·선택에 이용하거나 채널 상태에 따라 전송 매개변수를 조절한 것과 달리, 본 연구의 CBP-AODV는 중간 차량 노드가 측정한 local CBP로 새로운 RREQ의 시작과 보유 경로를 이용한 중간 RREP 생성 여부를 결정한다.

3. IEEE 802.11p/bd Studies and Research Scope

IEEE 802.11bd는 차세대 V2X 통신을 위해 IEEE 802.11p의 물리(PHY, Physical) 계층과 매체 접근 제어(MAC, Medium Access Control) 부계층 기능을 확장하며, 채널이 busy 상태였던 시간의 백분율을 나타내는 CBP 측정 기능을 제공한다 [2]. Ma는 신호 대 간섭및 잡음비(SINR, Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio) 분포를 바탕으로 IEEE 802.11p/bd 브로드캐스트 VANET의 계층별 성능과 안전 서비스 지원 성능을 분석하였다 [12]. Xue 등은 IEEE 802.11bd의 일부 개선 기능을 Veins에 구현하여 동적 교통 시나리오에서 두 표준의 데이터 전달 성능을 비교하였다 [13]. Iliopoulos 등은 IEEE 802.11bd의 주요 PHY 계층 및 MAC 부계층 기능과 V2X 서비스 적용 범위를 정리하였다 [14]. 이들 연구는 표준 기능과 무선 통신 성능을 분석한다.

검토한 문헌에서 AODV 개선 연구는 이동 정보와 링크 품질을 라우팅 경로 구성, 선택에 사용하고, 채널 상태 기반 연구는 무선 전송 매개변수를 조절하거나 채널 부하를 평가하였다. 그러나 이 문헌들은 중간 차량 노드의 새로운

www.kci.go.kr

RREQ 시작과 보유한 라우팅 경로에 따른 RREP 생성 판단에 해당 노드의 local CBP를 사용하는 방법을 다루지 않았다. 본 연구는 IEEE 802.11p 기반 무선 통신 모델에 IEEE 802.11bd의 CBP 측정 기능을 구현하고, 중간 차량 노드의 새로운 RREQ 시작 여부와 RREP 생성 여부를 결정하는 조건에 local CBP를 추가한다.

III. Design of CBP-AODV

1. Local CBP Measurement

CBP-AODV는 중간 차량 노드가 관측한 국소 채널 사용률(local CBP)을 기존 AODV의 경로 탐색 조건에 반영하는 기법이다. CBP는 측정 기간 중 채널이 busy 상태인 시간의 백분율이며 [2], 각 차량은 자신의 송수신 상태를 이용해 이를 계산한다. 본 구현은 IEEE 802.11p 기반 통신 모델에 CBP 측정 기능을 추가하여 송신 시간과 수신 상태가 BUSY 또는 RECEIVING인 시간을 집계한다.

채널 상태는 시뮬레이션 시작 후 30 s부터 100 ms 주기로 집계한다. AODV는 제어 판단 시점에 진행 중인 주기의 누적 busy 시간을 해당 주기의 경과 시간으로 나눈 값을 사용한다. 경과 시간이 0인 경우에는 직전 완료 주기의 값을 사용한다. 제어 판단에는 반올림하지 않은 값을 적용한다.

2. CBP Interval Configuration

허용 구간은 기준 AODV에서 얻은 CBP 관측값을 바탕으로 구성한다. RREQ 시작 과정과 중간 RREP 생성 판단에서 수집한 값은 관측 시점이 다르므로 각각 별도의 분포를 구성한다. 각 분포의 25·50·75 백분위수를 정수로 올림하여 세 경계를 정하고, 표 1과 같이 낮은 구간부터 Q1, Q2, Q3, Q4로 구분한다.

제어 방식별 PDR을 비교할 때에도 표 1의 RREQ·RREP 구간 경계를 그대로 사용하였다. 따라서 각 방식의 Q4는 같은 판단 지점에서 같은 CBP 범위를 뜻한다.

각 구간은 하한을 제외하고 상한을 포함하며 서로 겹치지 않는다. 따라서 Q4는 가장 높은 CBP 구간을 뜻하며, Q1부터 누적한 구간이나 CBP가 75% 이상인 구간을 의미하지 않는다. 구간은 제V장의 9개 시나리오에서 목적지를 바꾼 31회씩, 총 279회의 기준 AODV 실행 자료로 정하였으며, 모든 구간에서 CBP 0%는 제외한다.

표 1의 경계는 시드 32의 기준 AODV 자료에서 정하고, 성능 비교에 사용한 시드 1~5에 그대로 적용하였다.

Table 1. CBP intervals for RREQ initiation control and RREP generation control.

Interval	RREQ control (%)	RREP control (%)
Q1	(0, 19]	(0, 21]
Q2	(19, 32]	(21, 33]
Q3	(32, 43]	(33, 44]
Q4	(43, 100]	(44, 100]

3. Control Configurations

CBP-AODV의 제어 대상은 중간 차량 노드의 새로운 RREQ 시작과 RREP 생성이다. 새로운 RREQ 시작은 전달할 데이터의 목적지까지 사용할 경로가 없을 때 경로 탐색을 시작하는 동작이며, 수신한 RREQ를 다른 노드로 전달하는 동작과 구별한다. RREP 생성 제어는 수신 RREQ에 대해 보유 경로 정보를 제공할 수 있는 중간 차량 노드에 적용한다.

표 2의 세 제어 옵션에 각각 네 CBP 구간을 적용하여 12개 설정을 구성하고, 이를 CBP-AODV(c, Qi)로 나타낸다. 여기서 c는 RREQ, RREP 또는 RREQ+RREP이다. 결합 제어는 두 제어 지점에 같은 번호의 구간을 적용하되, 수치 경계는 각각 표 1을 따른다. 각 실행에서 선택한 구간은 고정하며, 비활성 제어 지점에서는 CBP 조건을 추가하지 않는다. 각 제어의 처리 절차와 예외 조건은 제IV장에서 설명한다.

Table 2. RREQ and RREP control configurations of CBP-AODV.

Configuration	RREQ control	RREP control
Legacy AODV	Off	Off
CBP-AODV (RREQ, Qi)	On	Off
CBP-AODV (RREP, Qi)	Off	On
CBP-AODV (RREQ+RREP, Qi)	On	On

IV. CBP-AODV Control Procedures

그림 1은 기준 AODV의 공통 처리를 묶고 CBP 조건과 불허 분기를 구분한 두 이벤트의 흐름이다. 결합 제어는 두 흐름을 활성화하는 설정이다. 출발지와 목적지의 예외는 노드의 역할에 따라 적용하므로 RSU에도 동일하다.

1. RREQ Initiation Control

그림 1(a)에서 활성 상태이며 다음 홉 주소가 지정된 목적지 경로가 있으면 목적지·다음 홉 경로의 수명을 갱신하

www.kci.go.kr

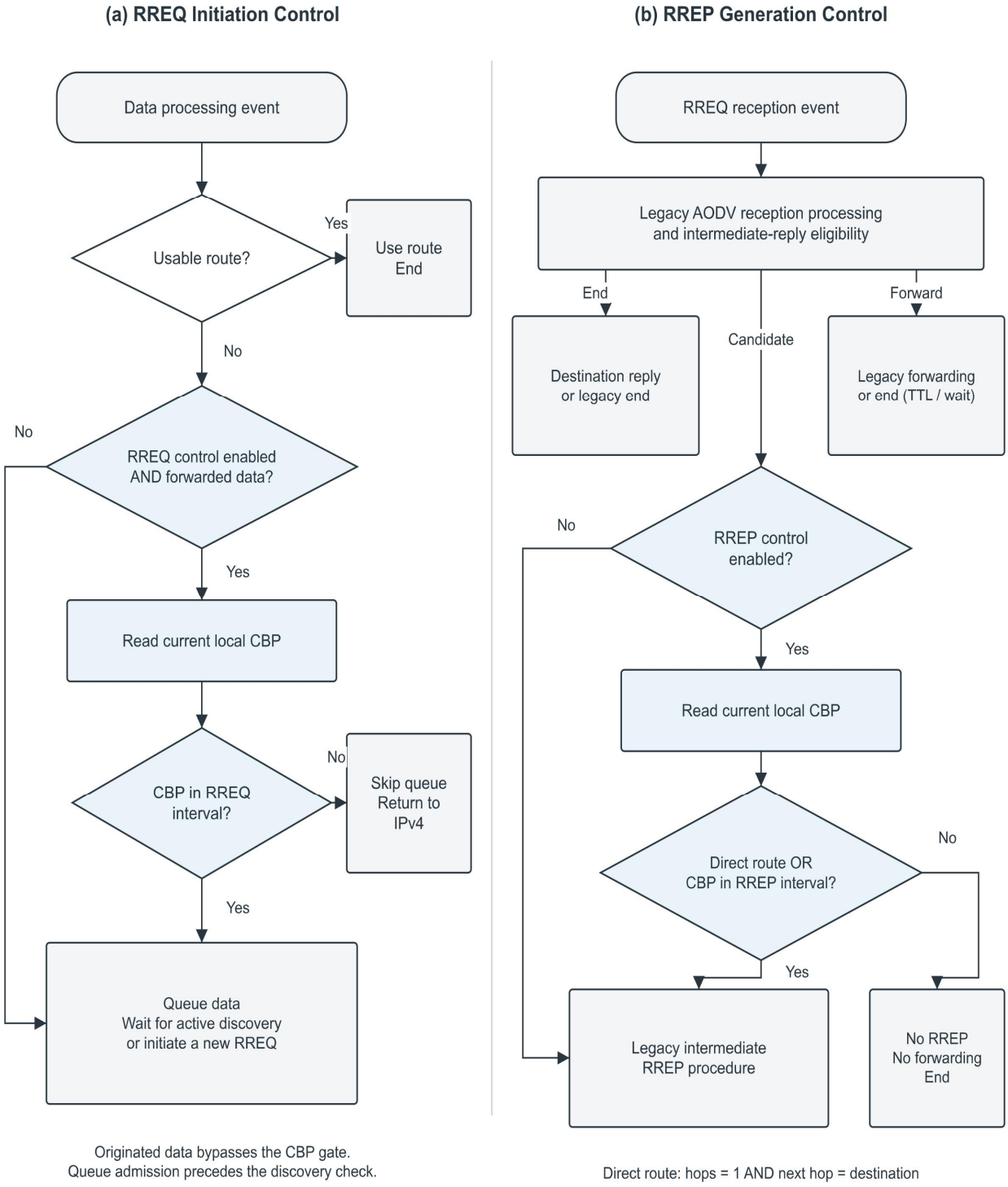

Fig. 1. CBP-AODV control procedures: (a) RREQ initiation control and (b) RREP generation control. The direct-route exception requires a one-hop destination route AND the destination as its next hop.

고 기존 전달을 계속한다. 경로가 없고 현재 노드에서 생성한 데이터이면 CBP와 관계없이 경로 탐색 대기열에 저장한다. 같은 목적지의 탐색이 진행 중이면 완료를 기다리고, 그렇지 않으면 RREQ를 생성하여 최초 브로드캐스트한다.

중계하는 데이터에 사용할 경로가 없고 RREQ 제어가 활성인 경우에는 현재 CBP를 조회한다. 허용 구간에 포함되면 대기열에 저장하고 기존 탐색을 기다리거나 새 탐색을 시작한다. CBP 조건은 큐 저장과 탐색 진행 여부 확인보다 먼저 적용하므로, 진행 중인 탐색을 기다릴 데이터의 큐 수용에도 영향을 준다.

CBP가 허용 구간에 포함되지 않으면 데이터를 대기열에 저장하거나 새로운 RREQ를 시작하지 않고 IPv4의 일

반 처리로 반환한다. 이 분기 자체는 즉시 폐기를 뜻하지 않는다. RREQ 제어가 비활성이면 CBP 검사 없이 기존 대기열 저장 및 탐색 절차를 수행한다.

2. RREP Generation Control

그림 1(b)의 기존 수신 처리는 블랙리스트 확인, 이전 홉 경로 생성·갱신, 중복 RREQ 확인, 홉 수 증가, 역방향 경로 생성·갱신 순서로 진행한다. 블랙리스트 또는 중복에 해당하면 해당 단계에서 종료한다. 현재 노드가 수신 RREQ의 목적지이면 CBP 조건 없이 RREP를 생성하여 역방향 경로로 전송하고 종료한다.

목적지가 아닌 노드는 활성 목적지 경로와 유효한 목적지 순서 번호를 보유하고, 그 번호가 RREQ의 요청 값 이상인지 확인한다. 이 조건을 충족하더라도 목적지 경로의 다음 홉이 RREQ의 이전 홉과 같으면 루프 방지를 위해 먼저 종료한다. 이 종료 분기에 해당하지 않고 목적지 전용 플래그가 설정되지 않은 노드가 중간 응답 후보가 된다.

중간 응답 후보에 RREP 제어가 활성화되어 있으면 현재 CBP를 조회한다. 목적지까지 1홉인 경로의 다음 홉이 목적지인 직접 연결 예외에 해당하거나 CBP가 RREP 허용 구간에 포함되면 기존 중간 RREP 생성 절차로 진행한다. 직접 연결 예외는 기존 응답 자격을 충족한 분기 안에서만 적용한다. RREP 생성 절차에는 목적지·역방향 경로 항목의 존재와 관리 주체 재확인이 포함되며, 정상적으로 생성한 RREP는 역방향 경로로 전송한다.

직접 연결 예외가 아니고 CBP도 허용 구간에 포함되지 않으면 RREP를 생성하지 않고 수신 RREQ의 처리를 종료한다. 이때 RREQ를 재전달하지 않는다. RREP를 생성한 분기도 응답 후 종료하며 RREQ 전달 분기로 이어지지 않는다. 반면 중간 응답의 경로 조건을 충족하지 못하거나 목적지 전용 플래그가 설정되어 전달 검토 분기에 도달한 RREQ는 기존 절차를 따른다. 남은 TTL이 0보다 크고 AODV 재시작 대기 시간이 끝났을 때 목적지 순서 번호를 갱신하여 전달하며, 그렇지 않으면 종료한다. 루프 방지나 CBP 불허로 종료한 RREQ를 이 전달 분기로 다시 보내지 않는다. 따라서 데이터 처리의 CBP 불허는 큐 수용 없이 IPv4로 반환하며, 수신 RREQ의 CBP 불허는 중간 응답과 해당 RREQ의 전달을 종료한다.

V. Experimental Methodology

1. Simulation Environment

차량 이동과 무선 통신을 연동한 시뮬레이션으로 CBP-AODV를 평가하였다. 네트워크에는 OMNeT++ 6.0.3과 INET 4.5를, 차량 이동에는 SUMO 1.0.1을 사용하였다. Veins를 통해 시뮬레이션 시간을 연동하고 차량의 위치를



(a) (b)

Fig. 2. Simulation environment in Mia-dong, Gangbuk-gu, Seoul: (a) study area and (b) the corresponding SUMO road network.

Table 3. Simulation and traffic parameters.

Parameter	Value
Network simulator	OMNeT++ 6.0.3 / INET 4.5
Mobility and coupling	SUMO 1.0.1 / Veins
Vehicle count	70, 100, 120
Maximum speed	10, 20, 30 km/h
Duration / traffic window	100 s / 30-100 s
Destinations per scenario, CBP boundary setting	31 (one per run)
Destinations per scenario, performance comparison	10 (one per run)
Random seed, CBP boundary setting	seed-set=32; repeat=1
Random seeds, performance comparison	seed-set=1-5; repeat=1
Wireless model	IEEE 802.11p + CBP measurement
Ping payload / period	512 B / 10 ms
Propagation model	LogNormalShadowing
Data rate	6 Mbps
Transmit power	8 mW
Noise floor / sensitivity	-110 dBm / -80 dBm
Bandwidth / frequency	10 MHz / 5.9 GHz

www.kci.go.kr

Table 4. CBP interval boundaries in the boundary-setting data and by random seed.

Data	RREQ 25%	RREQ 50%	RREQ 75%	RREP 25%	RREP 50%	RREP 75%
Seed 32	19	32	43	21	33	44
Seed 1	19	32	43	21	33	44
Seed 2	19	32	43	20	33	44
Seed 3	19	31	42	20	32	43
Seed 4	19	31	42	20	32	43
Seed 5	18	31	42	20	32	43

통신 노드에 반영하였다. 도로변 통신 장치(Roadside Unit, RSU) 한 대를 도로망 중앙에 고정 배치하고, 차량 노드는 IPv4와 AODV를 사용하도록 구성하였다.

도로 네트워크는 OpenStreetMap에서 취득한 서울특별시 강북구 미아동 일대의 도로 자료를 바탕으로 구성하였다. SUMO 1.0.1의 netedit로 도로망을 편집하고 duarouter로 차량별 이동 경로를 생성하였다. 그림 2는 대상 지역과 실험에 사용한 SUMO 도로 네트워크를 나타낸다.

무선 통신에는 IEEE 802.11p 기반 모델을 사용하고, IEEE 802.11bd의 CBP 측정 기능을 추가하였다 [2]. 표 3에 시뮬레이션과 트래픽 설정을 정리하였다. 차량 대수 70·100·120대와 최대 속력 10·20·30 km/h를 조합한 9개 시나리오를 구성하였다. 최대 속력은 이동 모델에 설정한 속력 상한이다. CBP 구간 경계는 각 시나리오에서 목적지 차량 31대와 시드 32의 기준 AODV 자료로 정하였다.

성능 비교에는 같은 도로망의 9개 시나리오에서 목적지 차량 10대와 시드 1~5를 조합하여 방식마다 450개 실행을 사용하였다. 기준 AODV와 결합 Q4는 차량 대수·최대 속력·목적지·시드가 같은 실행끼리 비교하였다. OMNeT++의 통신 난수와 SUMO의 차량 이동 난수에는 같은 시드 번호를 지정하였다.

성능 비교에 사용한 시드 1~5의 450개 실행은 경계 설정에 사용한 시드 32와 구분된다. 시드 1~5에는 표 1의 경계를 그대로 적용하였다.

2. Traffic and Compared Configurations

각 실행은 하나의 시나리오에서 목적지 차량 한 대를 지정하여 100 s 동안 수행하였다. RSU의 PingApp이 ICMP Echo Request를 전송하고, 목적지 차량이 Echo Reply를 반환한다. 요청의 페이로드는 512 B, 전송 간격은 10 ms이며, 전송 구간은 30~100 s이다. Ping 메시지와 AODV의 경로 제어 메시지는 각각 ICMP와 UDP를 사용한다.

시드 1~5의 성능 비교에서도 RSU는 목적지 차량 한 대에 512 B Ping 요청을 10 ms마다 보냈다. 각 실행의 요청 7,000개를 집계하였으므로, 뒤에서 제시하는 PDR은 이 트래픽 조건의 결과이다.

표 4는 구간 설정에 사용한 시드 32의 기준 AODV 자료와 성능 비교에 사용한 시드 1~5의 기준 AODV 자료에서 계산한 RREQ·RREP의 CBP 구간 경계를 비교한다.

구간 설정 자료의 RREQ 경계는 19·32·43%, RREP 경계는 21·33·44%로 표 1과 같다. 시드별 기준 AODV 자료에서 경계를 다시 계산하면 표 1의 값과 최대 1%p 차이가 났다. 결합 Q4의 성능 비교에는 재계산한 값 대신 표 1의 경계를 모든 시드에 적용하였다.

결합 Q4와 비교할 두 무작위 방식은 RREQ 시작과 중간 RREP 생성 판단에서 CBP 값을 사용하지 않는다. 매 판단 확률 추출 방식은 판단마다 0과 1 사이에서 허용확률과 별도의 난수를 새로 뽑아, 난수가 허용확률보다 작으면 해당 판단을 허용한다. Q4 허용비율 고정 방식은 별도 시드 6의 결합 Q4 실행에서 구한 시나리오별 RREQ·RREP 허용 비율을 확률로 고정하고, 판단마다 난수를 새로 뽑는다. 두 방식의 결과는 차량 대수·최대 속력·목적지·시드가 같은 450개 실행에서 결합 Q4와 비교하였다.

3. Performance Metrics and Aggregation

패킷 전달률(Packet Delivery Ratio, PDR)은 RSU가 전송한 Ping 요청 중 대응 응답이 RSU에 도달한 비율로 정의한다. 한 실행의 요청 전송 수를 Nreq, 대응 응답 수를 Nrep라 하면 다음과 같다.

$$\mathrm{PDR} = \frac{N_{rep}}{N_{req}} \times 100 \quad (\%) \tag{1}$$

이 정의는 요청과 응답을 포함한 왕복 전달의 성공을 평가한다. 응답을 받지 못한 Ping 요청도 Nreq에 포함하고, 대응 응답이 도착한 요청만 Nrep에 포함한다.

물리계층에서는 Ping 메시지의 수신 실패율을 평가한다. 본 연구에서는 간섭 신호가 존재한 상태에서 발생한 수신 실패를 집계한다. 한 실행에서 요청·응답 메시지의 수신 실패 건수를 각각 Ereq와 Erep, 물리계층 수신 시도 건수를 Areq와 Arep라 할 때 요청과 응답을 함께 고려한

www.kci.go.kr

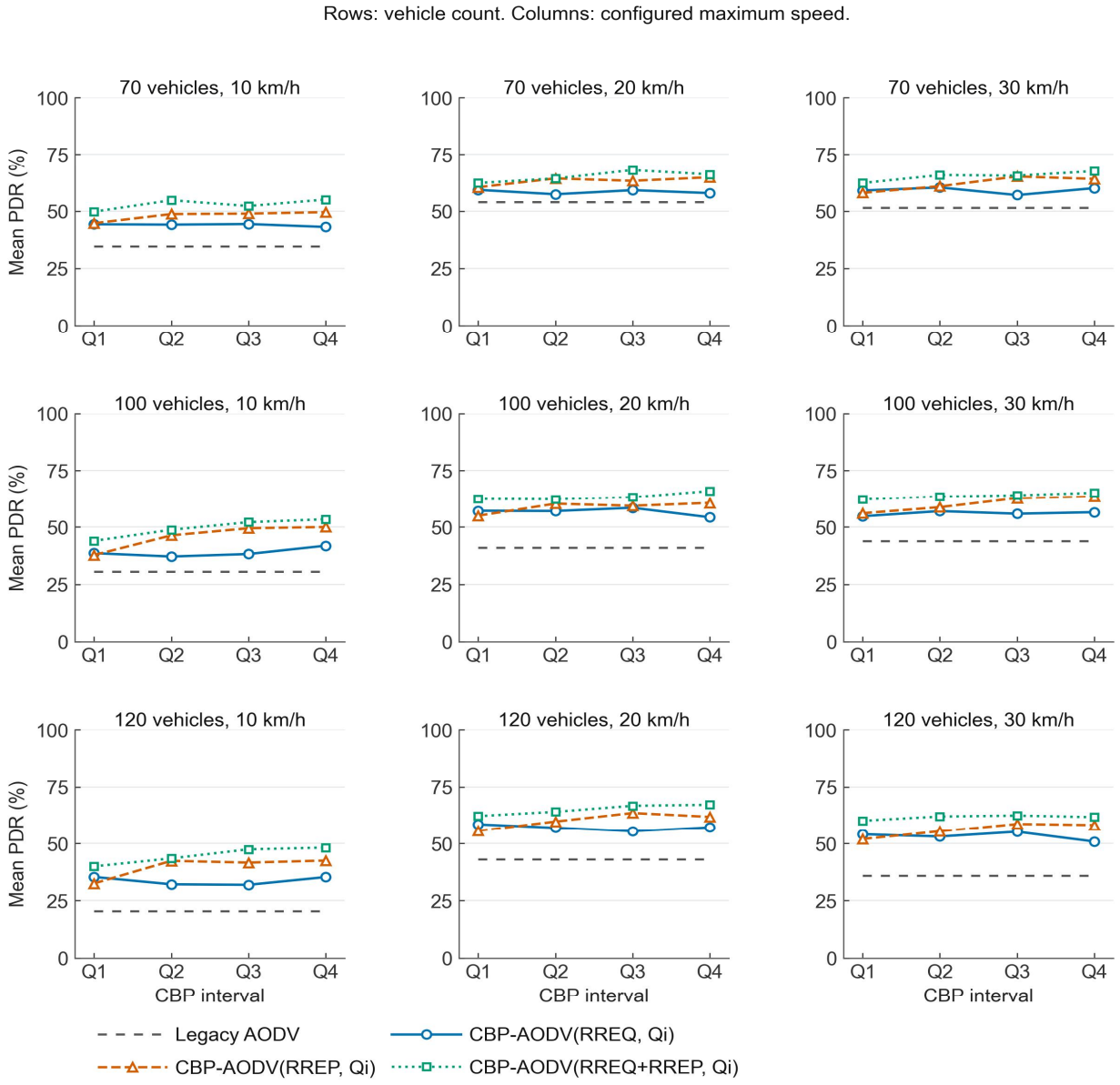

Fig. 3. Mean PDR of legacy AODV and CBP-AODV across vehicle counts, configured maximum speeds, and CBP intervals. Each point averages 10 destinations and random seeds 1–5 (50 runs); dashed lines indicate legacy AODV.

수신 실패율 F는 다음과 같다.

$$F = \frac{E_{req} + E_{rep}}{A_{req} + A_{rep}} \times 100 \quad (\%) \qquad (2)$$

식 (2)는 요청과 응답의 수신 실패 건수를 합산한 뒤 두 유형의 물리계층 수신 시도 건수 합계로 나눈 값이다. 따라서 요청·응답별 실패율의 단순평균과 달리 각 유형의 수신 시도 건수를 반영한다.

성능 비교에서는 각 실행의 PDR과 식 (2)의 수신 실패율을 각각 계산한다. 시나리오별 평균은 목적지 차량 10대와 시드 1~5를 조합한 50개 실행값의 산술평균이며, 전체 평균은 9개 시나리오 평균의 산술평균이다. 시나리오마다 실행 수가 같으므로 전체 평균은 450개 실행값의 산술평균과 같다.

실행별 PDR 변화는 동일한 시나리오·목적지·시드에서 CBP-AODV의 PDR에서 기준 AODV의 PDR을 뺀 ΔPDR로 계산하며, 단위는 %p이다. ΔPDR의 분포는 대응 산점도와 중앙값, 개선·악화 빈도로 제시한다.

PDR과 수신 실패율에 더해 RREQ·RREP 송신 횟수, 경로 탐색 시간, 목적지 경로 보유 비율과 Ping 왕복시간도 살펴본다.

www.kci.go.kr

RREQ·RREP 송신 횟수는 실행마다 RREQ 최초 송신·재전달과 RREP 생성 송신·재전달을 합한 값이다. 응답 성공 Ping의 평균 왕복시간(Round-Trip Time, RTT)은 RSU가 보낸 요청 중 응답이 돌아오고 송신 시각을 확인할 수 있는 요청의 왕복시간을 실행별로 평균한 값이다.

RERR 발생 횟수는 한 실행에서 RSU와 차량 노드의 RERR 생성·재전달 기록을 합한 값이다. 기록 한 건을 1회로 세고, 시나리오별·전체 평균은 각각 50개·450개 실행에서 계산한다. 하나의 경로 오류에서 여러 노드의 RERR 기록이 나올 수 있다.

RSU의 경로 탐색 시간은 목적지 경로를 찾는 데 성공한 탐색의 소요시간을 실행별로 평균한 값이다.

RSU의 목적지 경로 보유 비율은 RSU가 송신한 Ping 요청 수를 분모로, 그중 송신 시점에 목적지 경로가 유효했던 요청 수를 분자로 계산한다.

VI. Results and Discussion

본 절에서는 먼저 전체 제어 설정의 PDR을 비교하여 평균 PDR이 가장 높은 설정을 확인한다. 이어서 그 설정의 시나리오별 평균과 실행별 변화, 시드별·목적지별 평균을 살펴본다. 동일한 시나리오·목적지·시드의 기준 AODV를 비교 기준으로 사용한다. 다음으로 판단 시 CBP를 사용하지 않는 두 무작위 방식과 PDR·제어 메시지 송신 횟수를 비교하고, 기준 AODV와 Q4 설정들의 경로 보유 비율·경로 탐색 시간·Ping 왕복시간을 분석한다. 마지막으로 물리계층의 Ping 수신 실패율을 PDR과 함께 살펴본다.

1. PDR across CBP Intervals

그림 3은 기준 AODV와 CBP-AODV의 세 제어 방식에 대한 구간별 평균 PDR을 비교한 결과이다. 행은 차량 대수, 열은 설정 최대 속력이며, 수평 파선은 해당 시나리오의 기준 AODV 값이다. Q1~Q4는 서로 겹치지 않는 CBP 허용 구간이며, 연결선은 구간 간 성능 차이를 나타낸다.

전체 평균에서 기준 AODV의 PDR은 39.43%였고, CBP-AODV의 12개 설정은 모두 이보다 높았다. RREQ 방식은 Q1에서, RREP와 결합 방식은 Q4에서 각각 가장 높은 전체 평균을 보였다. RREQ, RREP 및 결합 제어 방식의 Q4 평균 PDR은 각각 50.74%, 57.21%, 61.11%로, 기준 AODV보다 11.31%p, 17.77%p, 21.68%p 높았다.

결합 Q4는 평가한 12개 설정 중 가장 높은 전체 평균을 보였다. 결합 Q4의 평균 PDR은 RREQ Q4보다 10.37%p, RREP Q4보다 3.91%p 높아, 두 제어를 함께 적용한 경우 단일 제어보다 추가적인 평균 향상이 나타났다. 이는 두 제어 지점에 국소 채널 사용률 조건을 함께 적용하는 구성이 평가 환경에서 전달 성능을 개선했음을 보여준다.

다만 개별 시나리오에서 가장 높은 PDR을 보인 구간은 일정하지 않았다. Q4가 같은 방식의 다른 구간보다 높았던 시나리오는 RREQ에서 1개, RREP에서 6개, 결합 방식에서 7개였다. 즉, 방식과 시나리오를 조합한 27개 비교 중 Q4가 최고인 경우는 14개이다. 결합 방식의 70대·20 km/h 조건에서는 Q3의 PDR이 67.94%로 Q4의 66.07%보다 1.88%p 높았다. 전체 평균에서의 우위가 모든 환경에서의 최적 구간을 뜻하지는 않는다.

이하에서는 전체 평균 PDR이 가장 높았던 결합 Q4를 중심으로, 세 제어 방식을 동일한 Q4 조건에서 비교한다. RREQ 방식 자체의 최고 평균 구간은 Q1이므로, 여기서 RREQ Q4는 방식별 최고 설정이 아니라 공통 구간 비교 대상이다.

2. Effects of Vehicle Count and Maximum Speed

Q4에서는 세 제어 방식 모두 9개 시나리오에서 기준 AODV보다 높은 평균 PDR을 보였다. 결합 방식의 개선폭은 70대·20 km/h의 12.17%p에서 120대·10 km/h의 27.66%p까지 분포하였다. 후자의 경우 기준 AODV의 20.48%에 비해 결합 방식은 48.14%를 기록하였다.

전체 평균의 향상과 함께, 기준 성능과 개선 정도가 시나리오에 따라 달라짐을 확인할 수 있다.

차량 대수의 영향은 기준 AODV와 CBP-AODV의 결합 제어 방식에서 서로 다른 양상으로 나타났다. 설정 최대 속력이 30 km/h일 때 기준 AODV의 PDR은 70·100·120대에서 각각 51.41%, 43.93%, 35.94%였으며, 결합 Q4는 67.47%, 65.14%, 61.72%였다. 이 조건에서 CBP-AODV의 결합 제어는 차량 대수가 증가할 때 기준 AODV에서 나타난 PDR 저하를 완화하였으며, 차량 대수가 많을수록 기준 AODV와의 성능 차이가 커졌다.

설정 최대 속력에 따른 PDR은 단조롭게 증가하거나 감소하지 않았다. 120대에서 결합 Q4의 평균 PDR은 최대 속력 10·20·30 km/h에서 각각 48.14%, 67.15%, 61.72%였다. 해당 차량 대수에서는 최대 속력 20 km/h 조건에서 가장 높은 평균 PDR을 보였다.

같은 Q4 구간을 적용한 세 방식 사이에서는 결합 방식이 9개 시나리오 모두에서 가장 높았다. 결합 방식 안에서 구간을 비교하면 70대·20 km/h와 120대·30 km/h에서는 Q3가 Q4보다 높았다. 두 조건의 Q3 PDR은 각각 67.94%,

www.kci.go.kr

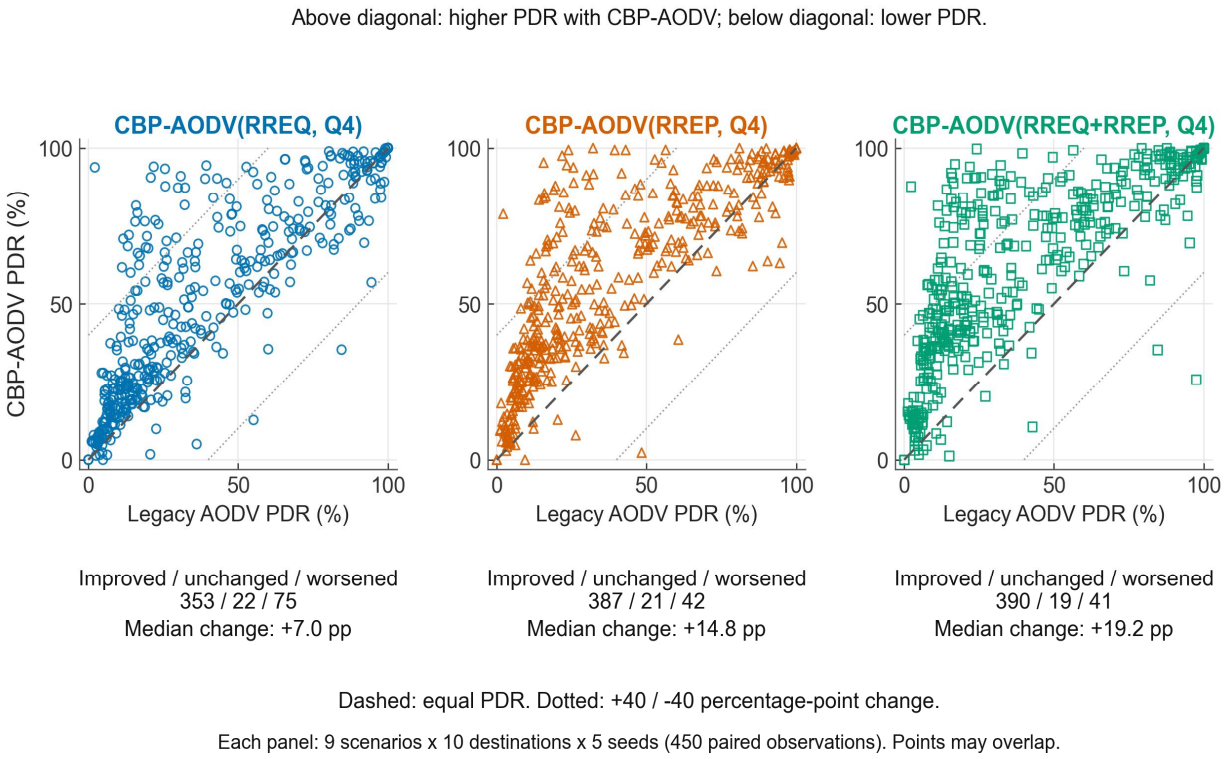

Fig. 4. Paired PDR of legacy AODV and CBP-AODV at Q4. Each panel contains 450 paired observations from 9 scenarios, 10 destinations, and seeds 1–5. The diagonal denotes equal PDR; dotted lines denote differences of ±40 percentage points.

62.41%로 Q4의 66.07%, 61.72%보다 높았다. 전체 평균의 개선이 모든 시나리오에서 Q4가 최적 구간임을 뜻하지는 않는다.

3. Run-Level PDR Changes and Destination Averages

시나리오 평균에서 나타난 개선이 개별 실행에서도 나타나는지 확인하기 위해 그림 4에서 동일한 실험 조건의 PDR을 짝지어 비교한다. 각 패널의 450개 점은 동일한 시나리오·목적지·시드의 기준 AODV PDR을 가로축에, CBP-AODV의 PDR을 세로축에 대응시킨 것이다. 대각선 위는 개선, 아래는 악화를 뜻한다. 대각선 파선은 두 방식의 PDR이 같은 경우를, 점선은 ±40%p 차이를 나타낸다.

세 방식 모두 대각선 위의 관측이 다수를 차지하였다. RREQ에서는 353개, RREP에서는 387개, 결합 방식에서는 390개의 PDR이 증가하였다. 실행별 PDR 개선량의 중앙값도 각각 6.97%p, 14.79%p, 19.21%p로 양수였다. 특히 결합 방식은 평균 PDR과 개선량 중앙값이 모두 가장 높아, 평균과 관측 분포의 중심에서 함께 개선을 보였다.

큰 개선과 악화의 비율을 함께 보면 방식별 특성이 더 분명해진다. 40%p 이상 개선된 관측은 RREQ에서 35개(7.8%), RREP에서 55개(12.2%), 결합 방식에서 82개(18.2%)였다. 반면 PDR이 감소한 관측은 각각 75개(16.7%), 42개(9.3%), 41개(9.1%)였다. 결합 방식은 전체 평균과 큰 개선의 비율이 가장 높았고, 악화한 관측의 비율은 세 방식 중 가장 낮았다. 이는 평균 성능과 개별 실행

Table 5. PDR, Ping reception failure rate, and run-level paired PDR changes at Q4 (n = 450; pp: percentage points).

Configuration	Mean PDR (%)	Mean failure rate (%)	Median ΔPDR (pp)	Improved n (%)	Worsened n (%)
Legacy AODV	39.43	30.18	–	–	–
CBP-AODV (RREQ, Q4)	50.74	18.79	+6.97	353 (78.4)	75 (16.7)
CBP-AODV (RREP, Q4)	57.21	14.40	+14.79	387 (86.0)	42 (9.3)
CBP-AODV (RREQ+RREP, Q4)	61.11	11.67	+19.21	390 (86.7)	41 (9.1)

www.kci.go.kr

Table 6. PDR by random seed for Legacy AODV and combined Q4.

Seed	Legacy AODV PDR (%)	Combined Q4 PDR (%)	Difference (%p)
1	36.12	60.63	+24.50
2	41.56	61.51	+19.95
3	40.28	59.73	+19.45
4	38.77	62.24	+23.46
5	40.43	61.47	+21.04
Overall	39.43	61.11	+21.68

다수의 개선이 함께 나타났음을 보여준다.

표 5는 Q4의 세 제어 방식에 대해 PDR, 물리계층 수신 실패율과 실행별 PDR 증감 빈도를 함께 보여준다. 시드가 달라져도 결합 Q4의 평균 PDR 우위가 유지되는지 확인하기 위해, 기준 AODV와의 시드별 평균 PDR을 표 6에 제시하였다.

표 6에서 결합 Q4의 시드별 평균 PDR은 기준 AODV보다 19.45~24.50%p 높았다. 성능 비교에 사용한 시드 1~5는 모두 경계 설정에 사용한 시드 32와 다르다. 시드별 비교에 이어 목적지 차량별 45개 실행의 평균을 보면, 기준 AODV의 PDR은 차량에 따라 8.65~70.10%였다. 결합 Q4는 목적지 차량 10대 모두에서 기준 AODV보다 평균 PDR이 9.58~30.78%p 높았다. 따라서 기준 AODV의 목적지별 PDR이 달라도 결합 Q4의 목적지별 평균 개선이 유지되었다.

Table 7. PDR comparison with random admission for matched destinations and seeds.

Configuration	Mean PDR (%)
Legacy AODV	39.43
CBP-AODV (RREQ+RREP, Q4)	61.11
Random admission (resampled probability)	52.29
Random admission (fixed Q4 admission rate)	61.21

4. Comparison with CBP-Free Random Admission

결합 Q4의 PDR 향상에서 제어 메시지 제한이 어떤 역할을 하는지 살펴보기 위해, CBP를 판단에 사용하지 않는 두 무작위 방식과 비교한다.

표 7에서 결합 Q4의 평균 PDR은 61.11%, 매 판단 확률 추출 방식은 52.29%였다. 두 방식은 RREQ·RREP 허용 기준과 실제 송신 횟수가 함께 달랐다. Q4 허용비율 고정 방식의 PDR은 61.21%로 결합 Q4와 비슷했지만, 실제 RREP 허용 횟수와 RREQ·RREP 송신 횟수는 달랐다. 같은 실행에서 집계한 실행당 RREQ·RREP 송신 횟수는 결합 Q4 9,497.4회, Q4 허용비율 고정 방식 16,101.7회였으며, Ping의 간섭 동반 물리계층 수신 실패율은 각각 11.67%, 14.47%였다. 따라서 Q4 허용비율 고정 방식에서도 결합 Q4와 비슷한 평균 PDR이 나타났으며, 결합 Q4의 제어 메시지 송신 횟수와 Ping 수신 실패율은 더 낮았다.

다음 절에서는 기준 AODV와 세 Q4 방식을 대상으로 제어 메시지 송신 횟수, RERR 발생 횟수, RSU의 목적지 경로 보유 비율, 경로 탐색 시간 및 Ping 왕복시간을 비교한다.

Table 8. RREQ and RREP transmissions per run.

Configuration	RREQ transmissions per run	RREP transmissions per run	Total transmissions per run
Legacy AODV	48,062.1	15,478.1	63,540.1
CBP-AODV (RREQ, Q4)	13,874.4	6,205.4	20,079.8
CBP-AODV (RREP, Q4)	16,152.3	1,939.7	18,091.9
CBP-AODV (RREQ+RREP, Q4)	8,629.2	868.3	9,497.4

Table 9. PDR and RSU destination-route availability at Ping request transmission.

Configuration	Mean PDR (%)	RSU active route share (%)
Legacy AODV	39.45	61.28
CBP-AODV (RREQ+RREP, Q1)	56.11	71.25
CBP-AODV (RREQ+RREP, Q2)	58.76	73.46
CBP-AODV (RREQ+RREP, Q3)	60.18	72.68
CBP-AODV (RREQ+RREP, Q4)	61.15	72.46

www.kci.go.kr

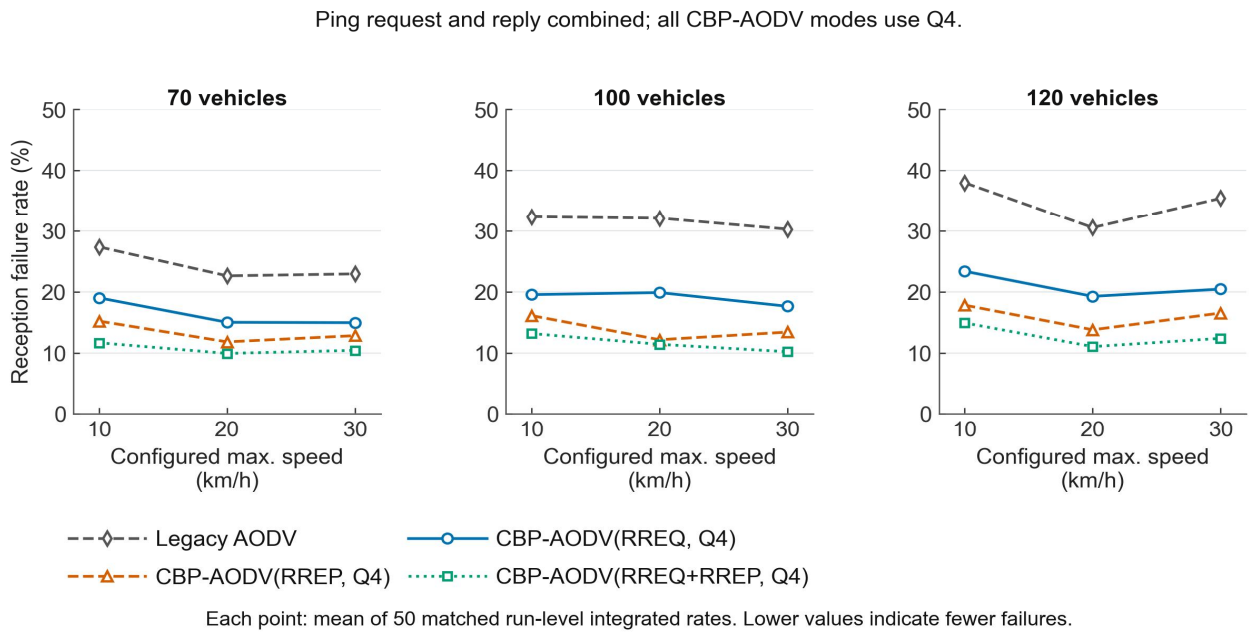

Fig. 5. Reception failure rate of Ping messages at the physical layer for legacy AODV and CBP-AODV at Q4. Each point averages 50 run-level ratios from 10 destinations and seeds 1-5, combining request and reply reception attempts.

5. Routing Control, Route Availability, and Timing Results

표 8은 기준 AODV와 세 Q4 방식의 실행당 평균 RREQ·RREP 송신 횟수를 보여주며, 표 8의 각 열은 원자료 평균을 개별적으로 반올림하였다. 결합 Q4의 실행당 RREQ·RREP 송신 횟수는 기준 AODV보다 85.05% 적었다.

Q4의 CBP 조건은 중간 차량 노드가 새로운 RREQ를 시작하거나 RREP를 생성하는 판단에 적용된다. 이미 유효한 경로가 있으면 Ping 데이터는 그 경로를 따라 전달된다. 표 9는 Ping 요청 송신 시 RSU가 목적지 차량으로 가는 유효 경로를 보유한 비율과 PDR을 비교한다. 다섯 방식은 시나리오·목적지·시드가 같은 조건에서 비교하였다. 표 9의 PDR은 경로 상태 기록을 대조할 수 있는 공통 실행을 기준으로 계산하였으므로, 전체 실행을 사용한 표 5의 PDR과 소폭 다르다.

표 9에서 결합 Q4의 RSU 경로 보유 비율은 기준 AODV의 61.28%보다 높은 72.46%였고, PDR도 39.45%에서 61.15%로 높았다. 표 8의 전체 평균에서는 결합 Q4의 RREQ·RREP 송신 횟수가 기준 AODV보다 적었다. 두 결과를 함께 보면 결합 Q4는 제어 메시지 송신을 줄이면서도 RSU가 목적지 경로를 보유한 Ping 요청의 비율이 높았다.

한편 결합 Q2의 경로 보유 비율은 73.46%로 Q4보다 1.00%p 높았지만, PDR은 58.76%로 Q4보다 2.39%p 낮았다. 따라서 결합 Q2와 Q4의 PDR 차이는 경로 보유 비율만으로 설명되지 않는다.

Ping 요청을 보낼 때 RSU에 유효한 목적지 경로가 있던 요청만 모으면, 응답을 받은 비율은 기준 AODV 55.68%, 결합 Q4 72.15%였다. 경로 보유가 실제 Ping 응답으로 이어진 기록을 확인하기 위해 한 실행을 살펴보았다. 차량 70대·최대 속력 10 km/h·목적지 차량 0·시드 5의 기록에서는 CBP가 60.42%인 중간 차량 9가 RREP를 생성하였다. RSU에는 이 차량을 거쳐 목적지에 이르는 경로가 기록되었고, 이어서 보낸 Ping 요청 4951번의 응답이 돌아왔다. 이 사례는 Q4에서 허용된 높은 CBP 차량이 실제 경로 확보와 Ping 전달에 연결된 기록을 보여준다.

표 10은 RSU가 목적지 경로를 찾는 데 성공한 탐색의 평균 시간과 응답 성공 Ping의 평균 왕복시간을 제시한다.

Table 10. PDR, successful route-discovery time, and RTT of replied Pings.

Configuration	Mean PDR (%)	Mean successful discovery time (ms)	Mean RTT of replied Pings (ms)
Legacy AODV	39.43	429.11	239.28
CBP-AODV (RREQ, Q4)	50.74	340.87	149.42
CBP-AODV (RREP, Q4)	57.21	517.72	139.12
CBP-AODV (RREQ+RREP, Q4)	61.11	534.11	127.71

www.kci.go.kr

Table 11. Mean RERR events per run.

Configuration	RERR events per run
Legacy AODV	6,658.5
CBP-AODV (RREQ, Q4)	2,780.5
CBP-AODV (RREP, Q4)	966.8
CBP-AODV (RREQ+RREP, Q4)	815.8

경로 탐색 시간은 실행별 평균을 다시 평균하였으며, Ping 왕복시간은 네 방식 모두에서 응답 시각이 기록된 실행의 평균이다.

결합 Q4는 기준 AODV보다 평균 PDR이 21.68%p 높았고, 응답 성공 Ping의 평균 왕복시간은 239.28 ms에서 127.71 ms로 줄었다. 한편 RSU의 경로 탐색 성공 시간은 429.11 ms에서 534.11 ms로 늘었다. 결합 Q4에서 RREQ·RREP 송신 횟수는 낮았고, Ping 응답의 도착 비율은 높았다. 왕복시간은 응답이 돌아온 Ping에 한정한 값이므로, 전체 요청의 전달 결과를 나타내는 PDR과 함께 해석한다.

표 11은 네 방식에서 기록된 실행당 평균 RERR 발생 횟수를 제시한다. RERR은 경로 오류나 전달 경로 부재를 알리는 제어 메시지이다.

기준 AODV의 RERR 발생 횟수는 실행당 평균 6,658.5회였고, RREQ Q4는 2,780.5회, RREP Q4는 966.8회, 결합 Q4는 815.8회였다. 결합 Q4는 표 8의 RREQ·RREP 송신 횟수와 표 11의 RERR 발생 횟수가 네 방식 중 가장 적었다. 이와 함께 표 9의 RSU 목적지 경로 보유 비율과 표 10의 PDR은 기준 AODV보다 높았다. RERR 발생 횟수는 네트워크 전체에서 생성·재전달된 경로 오류 메시지의 수를 나타낸다.

제어 메시지 송신량, 경로 보유·응답 시간과 RERR 발생 횟수를 비교한 뒤, 물리계층의 Ping 수신 실패율을 통해 서론에서 제기한 채널 사용 문제와 PDR 결과를 함께 살펴본다.

6. Reception Failure Reduction and PDR Improvement

표 5에서 확인한 전체 평균 수신 실패율의 차이가 시나리오별로도 나타나는지 살펴본다. 그림 5는 Q4를 적용했을 때 물리계층에서 Ping 메시지의 수신 실패율을 비교한 결과이다. V절의 정의에 따라 간섭이 동반된 수신 실패를 대상으로 하며, 각 점은 시나리오 평균이다. CBP-AODV의 세 제어 방식 모두 9개 시나리오에서 기준 AODV보다 낮은 평균 수신 실패율을 보였다. 전체 평균은 기준 AODV에서 30.18%였으며, RREQ Q4에서 18.79%, RREP Q4에서 14.40%, 결합 Q4에서 11.67%였다. 결합 제어 방식은 기준 AODV보다 18.50%p 낮았고, Q4의 세 제어 방식 중 모든 시나리오에서 가장 낮았다.

표 8과 표 9에서 결합 Q4는 기준 AODV보다 제어 메시지 송신 횟수가 적으면서도 RSU의 목적지 경로 보유 비율은 높았다. 그림 5에서는 물리계층 Ping 수신 실패율이 낮았고, 그림 3에서는 PDR이 높았다. 경로를 따라 전달되는 Ping 요청과 응답의 수신 실패가 줄어들면 대응 응답이 RSU에 도달할 가능성이 높아진다. 따라서 본 실험에서는 목적지 경로를 보유한 비율이 높아진 가운데 물리계층 Ping 수신 실패율이 낮아진 것이 PDR 향상에 기여한 것으로 해석된다.

VII. Conclusions

본 논문은 차량용 애드혹 네트워크의 패킷 전달 성능을 향상시키기 위해 국소 채널 사용률을 AODV의 경로 탐색 조건에 반영하는 CBP-AODV를 제안하였다. 중간 차량 노드의 새로운 RREQ 시작과 RREP 생성을 개별 또는 함께 제어하고, 각 제어 지점의 CBP 허용 구간에 따른 결과를 비교하였다. 차량 대수와 설정 최대 속력을 조합한 9개 시나리오에서 12개 설정을 평가하여, 제어 방식과 구간 선택이 전달 성능에 미치는 차이를 확인하였다.

평가한 설정 중 두 제어에 가장 높은 CBP 구간을 함께 적용한 설정의 전체 평균 PDR이 61.11%로 가장 높았으며, 기준 AODV의 39.43%보다 21.68%p 향상되었다. 이때 물리계층에서 Ping 메시지의 수신 실패율은 평균 30.18%에서 11.67%로 감소하여 PDR 향상에 기여하였다. 동일 조건의 실행별 PDR 개선량의 중앙값도 19.21%p로 양수여서 평균과 분포의 중심에서 개선을 확인하였다. 한편 환경별 최적 구간은 달랐으며, 결합 설정에서 PDR이 감소한 관측은 9.1%였다.

시드 32의 기준 AODV 자료에서 정한 표 1의 경계를 성능 비교에 사용한 시드 1~5의 450개 실행에 적용하였다. 시드별 CBP 자료로 다시 계산한 경계는 표 1과 최대 1%p 차이였으며, 다섯 시드 모두에서 결합 Q4의 평균 PDR이 기준 AODV보다 높았다.

시드별·목적지별 평균 PDR에서도 결합 Q4의 우위가 유지되었다. Q4 허용비율 고정 무작위 방식과는 평균 PDR이 비슷했지만, 결합 Q4의 RREQ·RREP 송신 횟수와 Ping의 간섭 동반 수신 실패율은 낮았다.

기준 AODV와 비교하면 결합 Q4의 제어 메시지 송신

www.kci.go.kr

횟수는 낮았고, RSU의 목적지 경로 보유 비율은 높았다. 성공한 경로 탐색의 평균 시간은 길었지만, 응답이 돌아온 Ping의 평균 왕복시간은 짧았다.

이번 결과는 한 도로망에서 RSU가 목적지 차량 한 대에 512 B의 Ping 요청을 10 ms마다 보낸 조건에 해당한다. 본 논문의 성능 해석은 이 도로망과 트래픽 조건을 기준으로 한다.

향후에는 도로망과 무선 조건을 달리하고, Ping 페이로드 크기와 송신 간격을 바꾸며 송신 시각의 변동을 반영하여 CBP-AODV의 적용 범위를 평가할 계획이다. 이 평가를 다중 송수신 흐름과 안전 메시지 트래픽으로 넓히고, PDR이 낮아지는 조건에서 경로 오류와 패킷 손실 과정을 추적하여 차량 이동과 국소 채널 상태에 맞는 CBP 허용 구간의 적응적 선택을 연구하고자 한다.

ACKNOWLEDGEMENT

This research was supported by the MSIT (Ministry of Science, ICT), Korea, under the National Program for Excellent in SW), supervised by the IITP (Institute of Information & communications Technology Planning & Evaluation) in 2026"(2024-0-00073)

REFERENCES

[1] C. E. Perkins, E. M. Belding-Royer, and S. R. Das, "Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing," RFC 3561, pp. 1-37, July 2003. DOI: 10.17487/RFC3561

[2] IEEE, "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 Amendment 5: Enhancements for Next Generation V2X," IEEE Std 802.11bd-2022, pp. 1-144, March 2023. DOI: 10.1109/IEEESTD.2023.10063942

[3] T. Chatterjee, R. Karmakar, G. Kaddoum, S. Chattopadhyay, and S. Chakraborty, "A Survey of VANET/V2X Routing From the Perspective of Non-Learning- and Learning-Based Approaches," IEEE Access, Vol. 10, pp. 23022-23050, February 2022. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3152767

[4] M. El-Dalahmeh, A. El-Dalahmeh, and U. Adeel, "Analysing the performance of AODV, OLSR, and DSDV routing protocols in VANET based on the ECIE method," IET Networks, Vol. 13, No. 5-6, pp. 377-394, October 2024. DOI: 10.1049/ntw2.12136

[5] K. A. Darabkh, M. S. A. Judeh, H. B. Salameh, and S. Althunibat, "Mobility aware and dual phase AODV protocol with adaptive hello messages over vehicular ad hoc networks," AEU - International Journal of Electronics and Communications, Vol. 94, pp. 277-292, September 2018. DOI: 10.1016/j.aeue.2018.07.020

[6] R. Al-Qassas and M. Qasaimeh, "An empirical evaluation of link quality utilization in ETX routing for VANETs," PeerJ Computer Science, Vol. 10, Article e2259, September 2024. DOI: 10.7717/peerj-cs.2259

[7] A. Balador, E. Cinque, M. Pratesi, F. Valentini, C. Bai, A. Alonso Gómez, and M. Mohammadi, "Survey on decentralized congestion control methods for vehicular communication," Vehicular Communications, Vol. 33, Article 100394, January 2022. DOI: 10.1016/j.vehcom.2021.100394

[8] B.-M. Cho, M.-S. Jang, and K.-J. Park, "Channel-Aware Congestion Control in Vehicular Cyber-Physical Systems," IEEE Access, Vol. 8, pp. 73193-73203, April 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2987416

[9] B. St. Amour and A. Jaekel, "Data Rate Selection Strategies for Periodic Transmission of Safety Messages in VANET," Electronics, Vol. 12, No. 18, Article 3790, September 2023. DOI: 10.3390/electronics12183790

[10] W. Zhuofei, S. Bartoletti, V. Martinez, and A. Bazzi, "Adaptive Repetition Strategies in IEEE 802.11bd V2X Networks," IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 72, No. 6, pp. 8262-8266, June 2023. DOI: 10.1109/TVT.2023.3241865

[11] A. Wippelhauser, T. A. Tomaschek, M. Verdes, and L. Bokor, "Real-Life Traffic Data Based ITS-G5 Channel Load Simulations of a Major Hungarian C-ITS Deployment Site," Applied Sciences, Vol. 13, No. 14, Article 8419, July 2023. DOI: 10.3390/app13148419

[12] X. Ma and K. S. Trivedi, "SINR-Based Analysis of IEEE 802.11p/bd Broadcast VANETs for Safety Services," IEEE Transactions on Network and Service Management, Vol. 18, No. 3, pp. 2672-2686, September 2021. DOI: 10.1109/TNSM.2021.3069206

[13] S. Xue, S. Gong, and X. Li, "A Comparative Study of IEEE 802.11bd and IEEE 802.11p on the Data Dissemination Properties in Dynamic Traffic Scenarios," Applied Sciences, Vol. 14, No. 5, Article 2099, March 2024. DOI: 10.3390/app14052099

[14] C. Iliopoulos, A. Iossifides, C. H. Foh, and P. Chatzimisios, "IEEE 802.11BD for Next-Generation V2X Communications: From Protocol to Services," IEEE Communications Standards Magazine, Vol. 9, No. 2, pp. 88-98, June 2025. DOI: 10.1109/MCOMSTD.2025.3569015

www.kci.go.kr

Authors



Jonghyeon Choe received the B.S. and M.S. degrees in Computer Engineering from Kongju National University, Korea, in 2023 and 2025, respectively. He has been pursuing the Ph.D. degree in Computer Engineering at Kongju National University since 2025. His research interests include vehicular communication networks and wireless networks.



Seungwoo Lee received the the B.D. in Computer Engineering from Kongju National University, Korea, in 2025, respectively.



Youngboo Kim received the B.S., M.S. and Ph.D. degrees in Information and Communication Engineering from Dongguk University, Korea, in 2011, 2013 and 2020, respectively.

Dr. Kim has been serving as a Post-doctoral researcher and lecturer at both Kongju National University and Dongguk University since 2020. His research interests encompass wireless networks, vehicular communication, computer security, and convergence security.



Seungmin Oh received the B.S. and Ph.D. degrees in computer engineering from Chungnam National University, Republic of Korea, in 2009 and 2015, espectively. From 2016 to 2019, he was a Postdoctoral Researcher with the Network Research Laboratory, University of California at Los Angeles, Los Angeles, CA, USA. Since 2019, he has been an Associate Professor with the Department of Computer Science and Engineering, Kongju National University. His research interests include routing protocols and applications for sensor networks, the Internet of Things (IoT), and the Internet of Vehicles (IoV).

www.kci.go.kr