

# 스마트하이웨이 테스트베드에서의 WAVE 기반 V2X 통신 성능에 대한 실험적 분석

## Experimental Analysis of V2X Communication Performance based on WAVE at the SMART-Highway Test-bed

정한균*	임기택**	신대교***	윤상훈****	진성근****	장수현****	신준수*****
(Han-Gyun Jung) (KETI)	(Ki-Taeg Lim) (KETI)	(Dae-Kyo Shin) (KETI)	(Sang-Hun Yoon) (KETI)	(Seong-Keun Jin) (KETI)	(Soo-Hyun Jang) (KETI)	(Joon-Soo Shin) (KEC)

### 요약

전 세계적으로 도로 상에서의 교통사고를 줄이고 교통 효율을 향상시키기 위한 많은 연구가 수행되어 왔으며, 최근에는 특히 C-ITS(Cooperative Intelligent Transportation System, 협력형 지능형교통체계) 기술을 기반으로 한 연구가 활발히 진행되고 있다. C-ITS 기술의 핵심은 인프라, 차량, 사람 등 도로시스템을 구성하는 요소들이 서로 간에 정보를 공유하고 재생성함으로써 도로안전 및 교통효율의 향상을 도모하는 것이며, 이를 위해 차량용 무선통신기술인 V2X(Vehicle-to-X) 통신기술이 적용되고 있다. 국내에서는 스마트하이웨이 연구를 통해 V2X 통신기술에 대한 연구가 진행되어 왔으며, 실제 고속도로 환경에서의 기술성능을 검증하기 위해 테스트베드를 구축하여 운영하고 있다. 본 논문에서는 스마트하이웨이 테스트베드에 대해 간략히 소개하고, 테스트베드 상에서의 성능 분석 절차 및 결과에 대해 기술한다.

핵심어 : 웨이브, 차량통신, 협력형 지능형교통체계, 스마트하이웨이, 테스트베드

### ABSTRACT

Many research activities to reduce accidents on the road and to improve traffic efficiency have been performed and almost research projects are developing technologies and services based on C-ITS technology nowadays. The main concept of C-ITS is improving road safety and traffic efficiency by sharing and reproducing information between various elements. To accomplish this goal, V2X communication technology has been adopted. In Korea, we have studied V2X communication technology in support of SMART-Highway research project and are managing test-bed to verify the developed technology recently. In this paper, we introduce SMART-Highway test-bed and show the procedure and result of V2X communication performance analysis on the test-bed.

Key words : WAVE, V2X, C-ITS, SMART-Highway, Test-bed

† 본 연구는 국토교통부 “스마트하이웨이 테스트베드 모니터링 및 활용”(과제번호 : 1615007564)과제의 지원으로 수행하였습니다.

† 본 논문은 한국ITS학회의 2016 ITS춘계학술대회에 게재되었던 논문을 수정·보완하여 작성하였습니다.

\* 주저자 및 교신저자 : 전자부품연구원 모빌리티플랫폼연구센터 선임연구원

\*\* 공저자 : 전자부품연구원 모빌리티플랫폼연구센터 센터장

\*\*\* 공저자 : 전자부품연구원 모빌리티플랫폼연구센터 책임연구원

\*\*\*\* 공저자 : 전자부품연구원 모빌리티플랫폼연구센터 선임연구원

\*\*\*\*\* 공저자 : 한국도로공사 스마트하이웨이사업단 차장, 서울대학교 건설공학부 박사과정

† Corresponding author : Han-Gyun Jung(KETI), E-mail junghg@keti.re.kr

† Received 13 June 2016; reviewed 5 July 2016; Accepted 22 August 2016

## I. 서론

전 세계적으로 도로 위에서 빈번히 발생하는 교통사고로 인하여 많은 사람들이 다치거나 사망하고 있으며, 많은 국가 및 연구소, 기업들은 다양한 방법 및 기술을 이용하여 이를 줄이기 위한 노력을 수행하고 있다. 특히, C-ITS 기술을 활용하여 안전 서비스를 제공함으로써 교통사고를 줄이고자 하는 연구들이 활발히 진행 중에 있다.

차량 환경에서의 통신을 위해 고안된 무선통신 기술표준인 WAVE(Wireless Access in Vehicular Environments) 기술은 C-ITS 기술의 근간이 되는 V2X 통신기술의 대표적인 기술이다[1-5]. 이 기술은 차량-인프라간 통신(V2I, Vehicle-to-Infrastructure)과 함께 차량간 통신(V2V, Vehicle-to-Vehicle)도 지원한다. V2I 통신만 지원하던 기존 ITS용 통신기술과 다르게 C-ITS에서는 WAVE 통신 기술의 적용을 통해 V2V 및 V2I 통신을 모두 지원함으로써 다양하고 확장성 있는 서비스를 제공할 수 있게 되었다.

무선통신을 이용하여 안전서비스를 제공하기 위해서는 무선통신기술의 성능 및 신뢰성이 반드시 확보되어야 하며, 실제 도로 상에서의 실험을 통한 성능 검증이 필요하다. 또한 각 서비스는 서비스의 요구사항 및 정보량에 따라 다양한 전송파라미터를 가질 수 있으므로 V2X 서비스를 실제 도로 상에 구현하기 위해서는 실 도로 상에서의 전송파라미터에 따른 통신 특성과 한계를 파악할 필요가 있다. 이를 위해 스마트하이웨이 연구에서는 공용도로 및 비공용도로 상에 테스트베드를 구축하여 V2X 통신 시스템의 성능 검증을 수행하고 있으며, 다양한 시나리오에 기반을 둔 실험을 통해 향후 V2X 서비스 요구사항 및 사양 도출 시 참고할 수 있는 레퍼런스 데이터를 제공하고자 하고 있다.

본 논문에서는 스마트하이웨이 테스트베드 상에서 V2X 통신성능을 실험적으로 분석한 결과를 보이고자 하며, 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 스마트하이웨이에 대해 소개하고, 3장에서는 스마트하이웨이 테스트베드에서 수행한 성능시험 및

분석 방안, 4장에서는 성능시험 결과를 보이며, 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

## II. 스마트하이웨이

스마트하이웨이는 첨단 도로기술 및 자동차기술, IT기술을 융합한 미래형 고속도로를 의미하며, 국토교통부의 지원으로 2008년부터 2014년까지 요소 기술 개발 및 통합 연구가 진행되었고, 현재에는 실제 고속도로 상에서의 테스트베드 운영을 통한 기술 검증이 진행되고 있다.

IT기술 분야에서는 레이더와 카메라를 이용하여 도로 위험을 감지하는 자동돌발감지시스템과 V2X 무선통신기술 및 서비스의 개발이 수행되었다[6, 7]. V2X 통신기술은 스마트하이웨이와 C-ITS의 핵심 기술이며, 현재 WAVE 통신기술이 스마트하이웨이 및 C-ITS의 V2X 통신기술로 적용되고 있다.

### 1. 스마트하이웨이 테스트베드

국토교통부 및 한국도로공사는 스마트하이웨이 연구에서 개발된 기술의 완성도를 실제 도로 상에서 검증하기 위해 비공용도로와 공용도로 상에 각각 테스트베드를 구축하였다.

비공용도로 테스트베드는 폐쇄된 시험전용도로로써 중부내륙고속도로 여주분기점 인근 7.7km 길이의 도로 상에 구축하였으며, 공용도로 테스트베드는 경부고속도로 서울TG에서 수원IC까지의 약 11km 구간 내 실제 고속도로 상에 구축하였다[8].

V2X 통신기술과 관련하여 비공용도로 테스트베드에는 5식의 RSE(Road-Side Equipment)가 설치되었으며, 시험용 OBE(On-Board Equipment)를 이용한 통신 성능 및 서비스 검증이 수행되었다. 공용도로 테스트베드에서 RSE는 본선 상 노변에 7개소, 서울TG 및 수원영업소에 각각 1개소 씩 총 9개소가 설치되었으며, OBE는 해당 고속도로 구간을 자주 이용하는 버스와 일반인 사용자를 포함한 100대의 차량에 배포되었다. 또한 도로 돌발상황 감지용 레이더와 카메라 시스템이 각각 4개소, 2개소 설치되어 운영센터 및 RSE에 연계되었다[9].

<Fig. 1>은 공용도로 테스트베드의 구축 현황을 나타낸다. 스마트하이웨이 연구에서는 V2X 통신시스템을 포함한 모든 개발 기술을 비공용도로 테스트베드에 구축하여 안정적인 시험 환경에서의



<Fig. 1> Test-bed on Gyeong-bu expressway

성능 및 신뢰성 검증을 수행한 후, 2차로 공용도로 테스트베드에 적용하여 실제 환경에서의 성능 및 신뢰성 검증을 수행하고 있다. 또한 공용도로 테스트베드에서는 노변시스템과 차량단말기를 통해 7개의 서비스를 운전자에게 시범 제공하고 있으며, 현재 제공 중인 서비스는 <Table 1>과 같다.

### III. 성능 시험 및 분석 방안

V2X 통신시스템의 기본 성능을 확인하고 실제 도로 환경에서의 통신 성능을 분석하기 위하여 비공용도로 및 공용도로 테스트베드 상에서 주행시험을 수행하였다.

비공용도로 테스트베드에서는 통신시스템의 기본 성능을 시험하기 위해 V2X통신성능지표에 대한 전송파라미터별 성능과 Throughput 성능을 측정하였다. 공용도로 테스트베드에서는 V2X통신성능지표에 대한 전송파라미터별 성능 측정과 더불어 현재 제공 중인 서비스 시나리오에 따른 성능 측정을 수행하였다. 공용도로 테스트베드에서 제공 중인 서비스는 통신 형태에 따라 인프라로부터 정보를 제공받는 I2V 서비스, 고정차량으로부터의 V2V 경고 서비스, 이동 차량들 간의 V2V 메시지 교환 서

비스로 분류되며 위 분류에 따라 3가지 주행 시나리오를 정의하여 시험을 수행하였다.

성능측정 항목인 V2X통신성능지표와 Throughput의 내용은 다음과 같다.

- V2X 통신성능지표 - 최대통신범위, 통신지연, PER(Packet Error Rate)

<Table 1> SMART-Highway test-bed services

Category	Service
I2V	Obstacle detection and warning
	Virtual VMS(Variable Message Sign)
	WAVE tolling
V2V	Road work
	Emergency vehicle approach
	Vehicle SoS
	Chain accident prevention

-V2X 통신 기반 C-ITS 서비스는 안전서비스 제공에 중점을 두고 있으며, 해당 서비스에서는 중요핵심정보가 포함된 단문 데이터를 손실 없이 빠르게 전송하는 것이 중요하다. 따라서 최대통신범위, 통신지연, PER 등을 주요 성능지표로 삼고 있다.

- Throughput

-초당 전송 가능한 비트수를 의미하며, 통신시스템의 정보전달용량에 대한 기본적인 성능을 파악하는 데 사용된다.

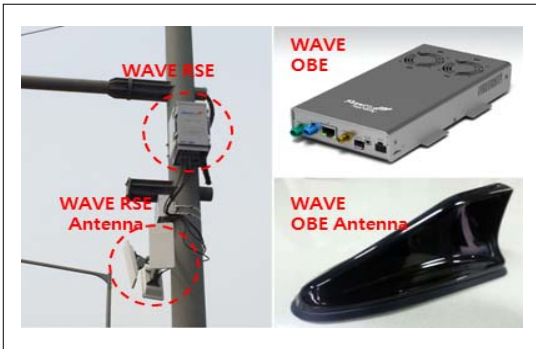
해외에서 진행 중인 C-ITS 연구 및 사업에서는 V2X 통신성능에 대해 비공용도로 측정 기준으로 약 300바이트 길이의 메시지를 6Mbps data rate로 전송했을 때 반경 300m 구간 내에서 PER 10%를 만족하도록 요구하고 있으며, 서비스 별로 허용되는 최대통신지연시간을 규정하고 있다[10-12].

국내에서 진행 중인 스마트하이웨이 연구에서는 공용도로 측정 기준으로 I2V의 경우 직경 1km, V2V의 경우 반경 500m 내에서의 평균PER 10%를 목표로 하고 있다.

### 1. V2X통신성능지표 시험

V2X통신성능지표에 관련된 성능을 측정하기 위한 구현 기능 및 분석 방안을 정의하였으며, 공용도로 테스트베드 시험을 위한 서비스 기반 주행 시나리오를 정의하였다.

#### 1) 좌표 획득 및 시간 동기화 기능 구현



<Fig. 2> Test devices

RSE 및 OBE는 통신거리 및 지연을 계산하기 위하여 GPS(Global Positioning System) 정보를 이용하여 주기적으로 자신의 위치 정보를 획득하고 UTC(Universal Time Coordinated) 시간에 동기화된다. 통신지연은 밀리초 단위로 계산되므로 각 장치는 밀리초 단위로 서로 동기화된다. GPS를 통해 획득한 위치정보 및 시간은 시험메시지에 수납되어 전송되고 수신 측에서는 수신된 정보와 자신의 정보를 함께 로그에 저장하며, 사후 분석 시 이를 통해 통신거리 및 지연을 계산한다.

#### 2) 시험 메시지 송수신 기능 구현

RSE 및 OBE는 사용자의 명령에 따라 송신메시지 길이, data rate, 파워, 채널, 주기를 변경하여 메시지를 송신하는 기능을 구현한다. 송신되는 메시지는 WSM(WAVE Short Message) 메시지이다. 시험 메시지의 형식은 <Fig. 3>과 같으며, 각 영역의 세부적인 내용은 다음과 같다.

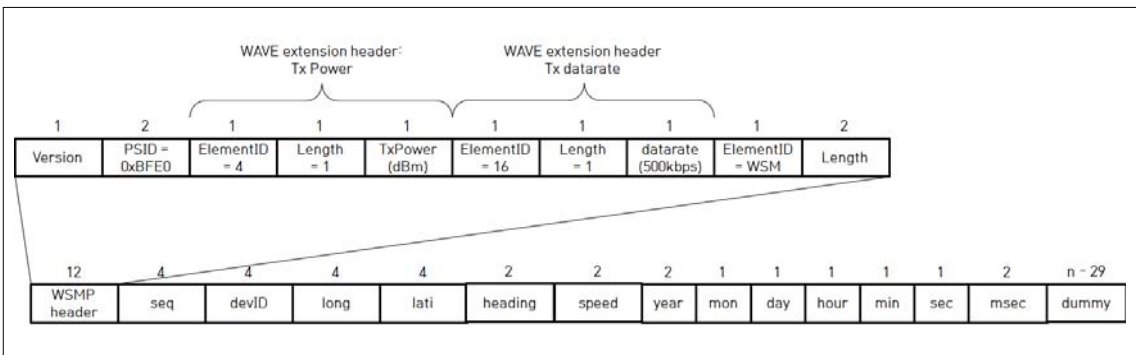
- 메시지의 PSID(Provider Service Identifier)는 시험용으로 할당된 0xBFEO를 사용한다.
- 수신 측에서 송신세기와 송신 data rate에 대한 정보를 로그에 저장할 수 있도록 WSM 헤더에 관련 확장 헤더를 삽입해서 송신한다.
- WSM 데이터 내에는 메시지 순서번호, 장치번호, 좌표, 방면, 속도, 송신시각이 포함된다.

OBE는 타 OBE 또는 RSE로부터 시험 메시지 수신시마다 성능 분석을 위한 정보를 로그 파일에 저장한다.

#### 3) 주행 시나리오

시험을 위한 기본적인 주행 시나리오는 OBE 장착차량이 RSE 또는 또 다른 OBE 장착차량의 통신영역을 반복하여 왕복 주행하면서 수신된 메시지를 로그 저장하거나 Throughput을 측정하는 것이며, 공용도로 테스트베드에서 실행된 서비스 기반 시험을 위해 다음과 같은 서비스 기반 주행 시나리오를 추가로 정의하였다.

서비스 기반 주행 시험 시, 시험 메시지들은 <Table 2>와 같은 통신 파라미터를 이용하여 전송



<Fig. 3> Test packet format

되며, 송신 메시지의 길이 및 **dat rate**, 주기, 세기는 현재 테스트베드에서 서비스되고 있는 서비스와 동일하게 설정된다.

주행 시나리오는 왕복 1회당 3개의 시나리오(I2V1, V2V2)로 구성되며, 그 내용은 다음과 같다.

- I2V 메시지 전송 시나리오
- V2V 메시지 교환 시나리오
- V2V 고정식 전후방 메시지 전송 시나리오

<Table 2> Test message transmit parameters

Parameter	Value
Channel number	178
data rate	6Mbps
Transmit power	20dBm
Message length	V2V : 150B, I2V : 200B
OBE Message transmit period	100msec
RSE Message transmit period	1sec

I2V 메시지 전송 시나리오 절차는 다음과 같다.

- 각 RSE는 I2V 메시지를 주기적으로 브로드캐스트 전송한다.
- 주행차량집단은 테스트베드 구간을 왕복하면서 수신된 I2V 메시지를 로그로 저장한다.
- 저장된 로그 분석 시, 테스트베드 I2V 통신 구간(RSE1~RSE7 통신영역)을 분석 범위로 한다.

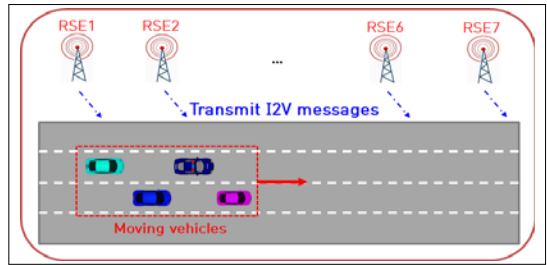
V2V 메시지 교환 시나리오 절차는 다음과 같다.

- 주행차량집단 내 각 차량은 V2V 메시지를 주기적으로 브로드캐스트 전송한다.
- 주행차량집단은 테스트베드 구간을 왕복하면서 수신된 V2V 메시지를 로그로 저장한다.
- 저장된 로그 분석 시, 테스트베드 전 구간(서울TG~수원IC)을 분석 범위로 한다.

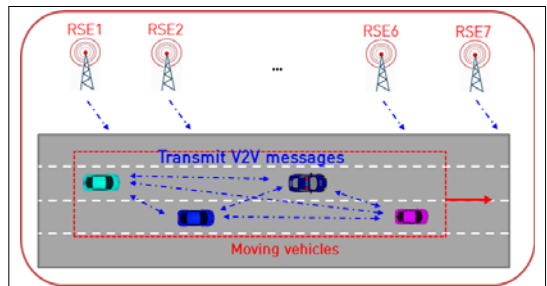
고정차량 V2V 메시지 전송 시나리오 절차는 다음과 같다.

- 주행차량집단 내 각 차량은 V2V 메시지를 주기적으로 브로드캐스트 전송한다.
- 정지차량은 미리 정차 위치에 정차하여 V2V 메시지를 주기적으로 브로드캐스트 전송한다.

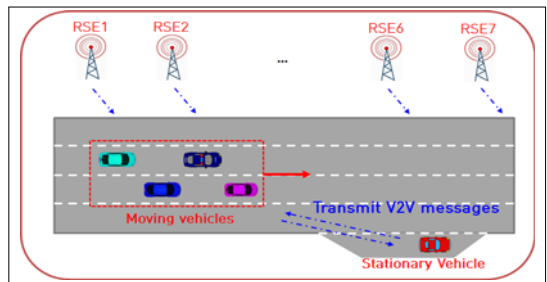
- 주행차량집단은 주행 중 정지차량으로부터 수신된 메시지를 로그로 저장하며, 정지차량은 주행차량들로부터 수신된 메시지를 로그로 저장한다.
- 저장된 로그 분석 시, 각 차량별로 “첫 메시지 수신 시점”부터 “정지차량 추월시점”까지를 분석 범위로 한다.



<Fig. 4> I2V message scenario



<Fig. 5> V2V message exchange scenario



<Fig. 6> Stationary vehicle V2V message scenario

#### 4) 로그 분석 및 결과 도출 방법

시험 종료 후 각 차량에 저장된 로그를 분석하여 통신성능을 확인한다.

최대통신범위는 통신형태에 따라 다르게 계산된다. I2V 메시지의 경우 전방최대통신거리와 후방최대통신거리의 합으로, V2V 메시지의 경우 시나리오에 따라 전방최대통신거리 또는 후방최대통신거리가 최대통신범위가 된다. 전방최대통신거리와 후방최대통신거리는 시험구간 내에서 수신된 메시지들의 통신거리 중 가장 긴 통신거리로 결정되며, 다음과 같이 계산된다.

$$MaxDist_i = MAX(D_i(Msg_k)) \quad 1 \leq k \leq RxMsgNum_i \dots(1)$$

$$D_i(Msg_k) = acos(a \times b + c \times d \times e) \times 6371 \times 1000$$

$$a = \cos(radian(90 - \frac{Lati_{Rx}}{10^7}))$$

$$b = \cos(radian(90 - \frac{Lati_i}{10^7}))$$

$$c = \sin(radian(90 - \frac{Lati_{Rx}}{10^7}))$$

$$d = \sin(radian(90 - \frac{Lati_i}{10^7}))$$

$$e = \cos(radian(\frac{Long_{Rx}}{10^7} - \frac{Long_i}{10^7}))$$

- $MaxDist_i$  : 장치  $i$ 로부터 수신된 메시지들 중 가장 긴 통신거리
- $D_i(Msg_k)$  : 장치  $i$ 로부터 수신된  $k$ 번째 메시지의 통신거리
- $RxMsgNum_i$  : 장치  $i$ 로부터 수신된 메시지 수
- $Lati_{Rx}/Long_{Rx}$  : 수신장치의 위도 및 경도
- $Lati_i/Long_i$  : 장치  $i$ 의 위도 및 경도

평균통신지연은 시험구간 내에서 수신된 각 메시지들의 통신지연에 대한 평균값으로 계산된다.

$$AvgDelay_i = \frac{\sum_{k=1}^{k=RxMsgNum_i} D_i(Msg_k)}{RxMsgNum_i} \dots\dots\dots(2)$$

- $AvgDelay_i$  : 시험구간 내에서 장치  $i$ 로부터 수신된 메시지들에 대한 평균통신지연
- $D_i(Msg_k)$  : 장치  $i$ 로부터 수신된  $k$ 번째 메시지의 통신지연
- $RxMsgNum_i$  : 장치  $i$ 로부터 수신된 메시지의 수

평균PER은 시험구간에서 수신된 메시지들 중 유효통신거리 내에서 수신된 메시지 전체를 대상으로 다음과 같이 계산된다. 유효통신거리는 V2I의 경우 직경 1km, V2V의 경우 반경 500m로 설정된다.

$$AvgPER_i(R_v) = 100 - \frac{RxMsgNum_i(R_v)}{ExMsgNum_i(R_v)} \times 100 \dots(3)$$

$$ExMsgNum_i = MsgSeq_i(R_v, last) - MsgSeq_i(R_v, first) + 1$$

- $AvgPER_i(R_v)$  : 전체 유효통신구간( $R_v$ ) 내에서 장치  $i$ 로부터 수신된 메시지들에 대한 평균 PER
- $RxMsgNum_i(R_v)$  :  $R_v$  내에서 장치  $i$ 로부터 수신된 메시지들의 수
- $ExMsgNum_i(R_v)$  :  $R_v$  내에서 장치  $i$ 가 송신한 메시지들의 수
- $MsgSeq_i(R_v, last)$  :  $R_v$  내에서 장치  $i$ 로부터 마지막으로 수신된 메시지의 순서번호
- $MsgSeq_i(R_v, first)$  :  $R_v$  내에서 장치  $i$ 로부터 처음으로 수신된 메시지의 순서번호

구간PER은 SAE J2945-1 규격에 정의된 내용을 준용하여 슬라이딩 윈도우 기법을 적용해 다음과 같이 계산된다[13].

$$PER_i(k) = 100 - \frac{RxMsgNum_i(W_{k-n+1}, W_k)}{ExMsgNum_i(W_{k-n+1}, W_k)} \times 100 \dots(4)$$

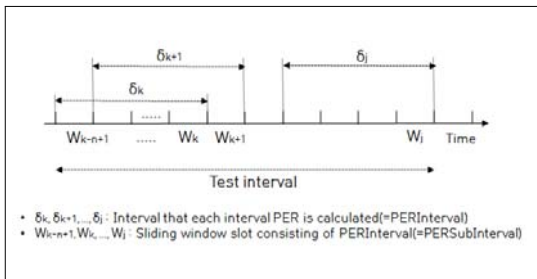
$$ExMsgNum_i = MsgSeq_i(W_{k-n+1}, W_k, last) - MsgSeq_i(W_{k-n+1}, W_k, first) + 1$$

- $PER_i(k)$  : 각 구간( $k$ ) 내에서 장치  $i$ 로부터 수신된 메시지들에 대한 PER
- $RxMsgNum_i(W_{k-n+1}, W_k)$  : ( $W_{k-n+1} \sim W_k$ ) 구간에서 장치  $i$ 로부터 수신된 메시지 수
- $ExMsgNum_i(W_{k-n+1}, W_k)$  : ( $W_{k-n+1} \sim W_k$ ) 구간에서 장치  $i$ 가 송신한 메시지 수
- $MsgSeq_i(W_{k-n+1}, W_k, last)$  : ( $W_{k-n+1} \sim W_k$ ) 구간에서 장치  $i$ 로부터 마지막으로 수신된 메시지의 순서번호

- $MsgSeq_i(W_{k-n+1}, W_k, first) : (W_{k-n+1} \sim W_k)$  구간에서 장치  $i$ 로부터 처음으로 수신된 메시지의 순서번호

## 2. Throughput 시험

Throughput 시험은 오픈소스 측정 툴인 JPerf를 이용하여 수행한다[14]. RSE 및 OBE의 랜 포트에 각각 측정 툴이 설치된 노트북을 각각 연결하고, 해당 노트북 사이에서 Throughput 측정용 데이터를 WAVE 통신으로 교환하여 Throughput을 측정한다.



<Fig. 7> Interval PER calculation

RSE는 측정용 데이터를 지속적으로 전송하며, OBE가 탑재된 차량은 RSE의 통신 영역을 반복하여 왕복주행하면서 측정용 데이터를 수신하여 Throughput을 측정한다.

## IV. 성능 시험 결과 및 논의

### 1. 비공용도로 테스트베드 성능시험

비공용도로 테스트베드는 도로시설물, 주변 차량 등 외부환경요인이 최소화된 상황에서 LOS(Line Of Sight) 확보가 용이하여 통신시스템 본연의 성능을 비교 평가하기에 적합하다. 해외에서는 동일한 시험환경에서의 정확한 성능 평가를 위해 V2X 통신 시스템에 대한 인증은 폐쇄된 시험전용도로 상에서 수행하고 있으며, 국내에서 진행 중인 C-ITS 시범사업의 V2X 장비에 대한 역시 비공용도로인 시험도로에서 수행되었다.

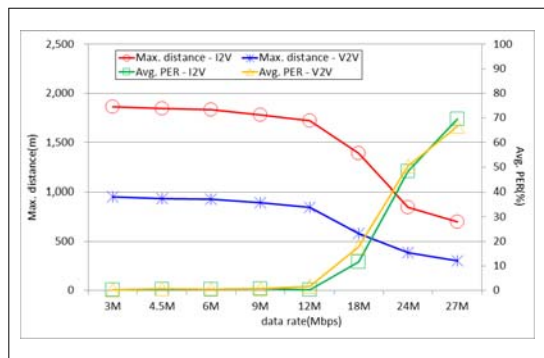
비공용도로 테스트베드에서의 시험은 I2V 통신 및 V2V 통신에 대해 각각 수행되었으며, 세부적인

시험환경은 다음과 같다.

- RSE 1식, OBE 2식(고정차량, 주행차량)
- 주행차량속도 : 100~120km/h
- I2V 시험 : 주행차량이 RSE의 통신 영역을 반복하여 왕복 주행
- V2V 시험 : 시험도로 상 특정 위치에 송신차량을 정차하고, 주행차량이 해당 차량의 통신 영역을 반복하여 왕복 주행

### 1) 전송파라미터별 V2X 통신성능지표 측정 및 분석

I2V와 V2V 통신에 대해 data rate 별 최대통신범위와 평균PER 성능을 측정하였다. 송신용 차량과 기지국은 1000바이트 길이의 메시지를 data-rate 3, 4.5, 6, 9, 12, 18, 24, 27Mbps로 실시간 변경하면서 전송하며, 수신차량에 저장된 로그를 분석하여 성능을 측정하였다. 시험에 사용된 메시지 길이와 data rate는 WAVE 통신기술의 물리계층 표준인 IEEE 802.11p 문서에 정의된 바를 따랐다.



<Fig. 8> Max. distance/Avg. PER vs. data rate

시험결과는 각 시험 및 왕복 회차에 대한 결과를 통합하여 분석하였으며, <Fig. 8>은 전송파라미터에 따른 최대통신범위 및 평균PER 성능을 나타낸다. 결과에 따르면, 최대통신범위와 평균 PER 성능은 data rate에 영향을 받으며, 12Mbps까지는 영향의 정도가 미약하고, 18Mbps부터 크게 영향을 받는 것을 알 수 있다.

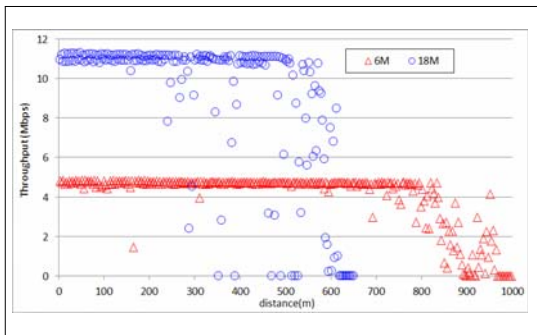
최대통신거리는 data rate가 증가할수록 감소하며

I2V의 경우 3~12Mbps로 전송 시 직경 1.5~2km, 18Mbps로 전송 시 직경 1~1.5km, 27Mbps로 전송 시 직경 1km 이하로 측정되었으며, V2V의 경우 3~18Mbps로 전송 시 반경 0.5~1km, 24Mbps 이상으로 전송 시 반경 0.5km 이하로 측정되었다.

평균PER은 data rate가 증가할수록 증가하며, 12Mbps까지는 약 1% 정도의 매우 우수한 성능을 보이고 18Mbps부터는 가파르게 증가한다.

## 2) I2V Throughput 성능 측정 및 분석

WAVE 통신의 최대 전송속도를 확인하기 위하여 Throughput 측정 시험을 진행하였다. Throughput 측정은 I2V 통신에 대해 data rate 별로 측정하였으며, 본 논문에서는 C-ITS V2X 서비스의 기본 메시지 data rate인 6Mbps와 이동서비스가 가능한 최대 data rate인 18Mbps에 대한 결과를 기술한다.(시험 결과 64-QAM 변조방식인 data rate 24, 27Mbps는 PER이 높고 통신거리가 짧아 차량 주행 환경에서는 적용하기 어려운 것으로 판단된다.)



〈Fig. 9〉 Throughput vs. distance

〈Fig. 9〉는 WAVE 장치의 송신 data rate를 각각 6Mbps, 18Mbps로 설정하여 Throughput을 측정한 결과이다. 그래프 상의 X축은 Throughput이 측정된 지점과 기지국 사이의 거리를 나타낸다. 6Mbps 전송 시 통신거리 500m 내에서 평균 4.73Mbps, 18Mbps 전송 시 통신거리 500m 내에서 평균 10.29Mbps의 Throughput이 측정되었다. 거리별 Throughput의 변화 양상을 살펴보면, 6Mbps의 경우 약 700m 지점

까지 안정적인 Throughput을 보이며, 이후부터 감소하기 시작하여 약 1km 지점부터는 통신이 단절되어 더 이상 측정되지 않는다. 18Mbps의 경우에는 약 500m 지점까지 고른 Throughput 성능을 보이지만 몇몇 지점에서 저하되는 현상이 관측된다. 이는 시험도로 상에 설치되어 있는 일부 도로 시설물에 영향을 받기 때문이다. 500m 이후부터 Throughput은 감소하기 시작하여 600m 이후부터는 통신이 단절되어 더 이상 측정되지 않는다.

시험 결과, 통신범위 500m 내에서 평균 10Mbps까지의 정보를 전송할 수 있음을 알 수 있다.

## 2. 공용도로 테스트베드 성능시험

비공용도로 테스트베드에서의 성능시험은 통신시스템 본연의 성능을 측정하는 데 중점을 두었으나, 공용도로 테스트베드에서는 실제 도로에서의 서비스 제공 환경에 대한 통신 성능의 수준 및 변화를 분석하는 데 중점을 두어 테스트를 수행하였다.

### 1) 전송파라미터별 V2X 통신성능지표 측정 및 분석

C-ITS 서비스들의 종류와 특성은 다양하며, 그중 V2X 통신 기반 서비스의 경우 각 서비스 별 요구사항이나 정보량 등에 따라 무선통신구간에서 사용되는 전송파라미터가 달라질 수 있다. 본 절에서는 메시지길이 및 data rate의 변화에 따른 공용도로 상에서의 통신 성능 변화를 분석함으로써, 향후 V2X 서비스 요구사항 및 사양 도출 시 참고할 수 있는 레퍼런스 데이터를 제공하고자 한다.

송신차량과 기지국은 150, 600, 1000, 1400바이트 길이의 메시지를 data rate 3, 6, 12, 27Mbps로 실시간 변경하면서 전송하며, 수신차량에 저장된 로그를 분석하여 성능을 측정한다.

시험은 I2V 통신 및 V2V 통신에 대해 각각 수행되었으며, 세부적인 시험환경은 다음과 같다.

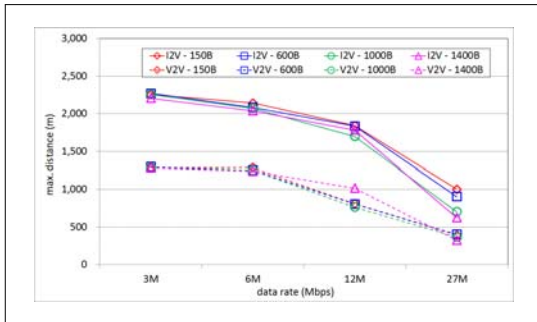
- RSE 2식, OBE 2식(고정차량, 주행차량)
  - 주행차량속도 : 가변 (교통흐름에 의존)
  - 주행차량이 공용도로 테스트베드 구간 (서울 TG~수원 IC)을 반복하여 왕복 주행
- 시험결과는 각 시험 및 왕복 회차에 대한 결과를



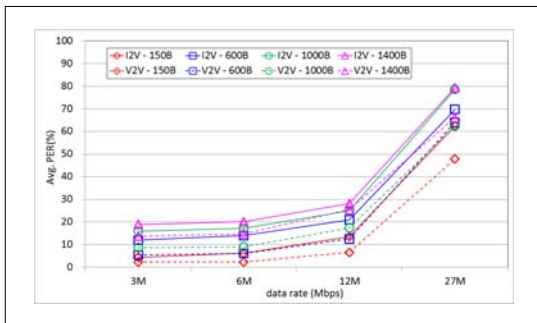
통합하여 분석하였으며, <Fig. 10~12>는 전송파라미터별 성능을 나타낸다. 결과에서 볼 수 있듯이, 각 성능지표에 대한 성능은 메시지 길이 및 data rate에 따라 크거나 작은 영향을 받는다.

최대통신거리는 I2V의 경우 3, 6, 12Mbps로 전송 시 직경 1.5km 이상, 27Mbps로 전송 시 직경 0.5~1km 사이로 측정되었으며, V2V의 경우 3, 6Mbps로 전송 시 반경 1~1.5km 사이, 12Mbps로 전송 시 0.5~1km 사이, 27Mbps로 전송 시 0.5km 이하로 측정되었다. 결과에 따르면, 메시지의 길이보다는 data rate가 최대통신거리 성능에 영향을 더 주는 것을 알 수 있다.

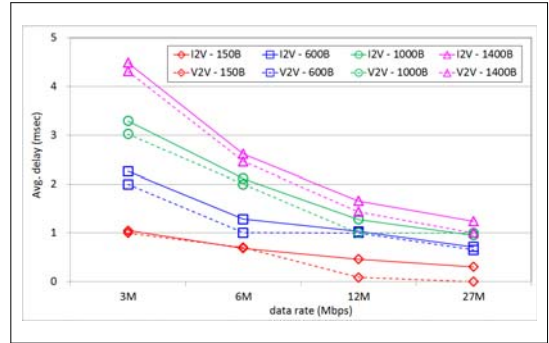
평균통신지연은 메시지 길이가 증가할수록, data rate가 낮을수록 증가한다. 이는 재전송이 없는 브로드캐스트 환경에서 통신지연은 메시지 길이와 data rate에 관련되어 계산되기 때문이다. 최고통신지연 조합인 {3Mbps, 1400바이트}에서는 약 4~5msec의 지연을 가지며, 최저통신지연 조합인



<Fig. 10> Max. distance vs. data rate/length



<Fig. 11> Avg. PER vs. data rate/length



<Fig. 12> Avg. delay vs. data rate/length

{27Mbps, 150바이트}에서는 1msec 이하의 지연을 가진다.

평균 PER은 메시지 길이 및 data rate가 증가할수록 증가하며, 메시지의 길이보다는 data rate가 평균 PER 성능에 영향을 더 주는 것을 알 수 있다. I2V의 경우, 3~6Mbps의 낮은 data rate와 150바이트 정도의 단문 메시지 정도가 유효통신범위 내에서 PER 10% 미만의 성능을 만족하는 것을 알 수 있으며, V2V의 경우, 경우에 따라 메시지 길이 1000바이트 및 12Mbps까지도 PER 10% 미만의 성능을 만족하는 결과가 나타난다. 단, V2V는 I2V에 비해 주변 장애물들에 의한 영향을 많이 받아 성능의 편차는 심한 편이다. PER은 단순히 메시지 길이와 data rate 뿐 아니라, 주변 장애물(도로구조물, 주변차량 등)에 의해서도 크게 영향을 받기 때문에, 공용도로 상에서는 주행 상황에 따라 많은 편차를 보인다.

결과적으로, data rate 및 메시지 길이가 증가할수록 전체적인 성능은 감소하고 있으며, 특히 27Mbps의 경우에는 실제 도로에서 운행 중에 사용하기에 충분한 성능이 확보되지 않았다.

현재 테스트베드에서는 약 150~200바이트의 메시지가 6Mbps의 data rate로 전송되고 있다. 이 수준의 단문 메시지는 통신거리 500m 내에서 PER 10% 이하의 통신신뢰성을 바탕으로 안전서비스에 적용될 수 있을 것으로 보이며, 인포테인먼트 등 대용량의 메시지가 필요한 서비스의 경우에는 시험 결과를 바탕으로 통신용량 및 통신범위 등 품질 수준을 설계하고, 적절한 data rate와 메시지 길이 정의 및 재전송 기법 등의 적용을 고려할 필요가 있다.

2) 서비스 시나리오 기반 V2X통신성능지표 측정 및 분석

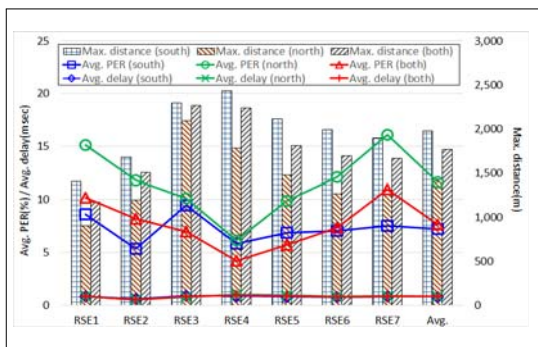
앞서 기술한 바와 같이 공용도로 테스트베드에는 7가지의 서비스가 제공되고 있으며, 본 절에서는 해당 서비스 시나리오에 따라 수행된 성능 시험 결과를 기술한다.

시험은 테스트베드 통신영역 전 구간에 걸쳐 I2V 통신 및 V2V 통신에 대해 동시에 수행되었으며, 세부적인 시험환경은 다음과 같다.

- RSE 7식, OBE 6식(송신차량 2, 주행차량 4)
- 주행차량속도 : 가변 (교통흐름에 의존)
- 송신차량 2대는 죽전BS, 죽전SA, 하이패스센터 등 지정 위치에 정착하여 시험메시지 전송
- 주행차량 집단은 공용도로 테스트베드 구간을 반복하여 왕복 주행

시험결과는 모든 차량의 각 시험 및 왕복 회차에 대한 결과를 통합하여 분석하였다.

<Fig. 13>은 I2V 서비스에 대한 시험 결과를 나타낸다. I2V의 경우 최대통신범위는 평균 1.7km, 평균통신지연은 평균 0.8msec의 값을 보이고 있다. 평균 PER은 평균 7.63%의 양호한 성능을 보인다.



<Fig. 13> I2V communication performance

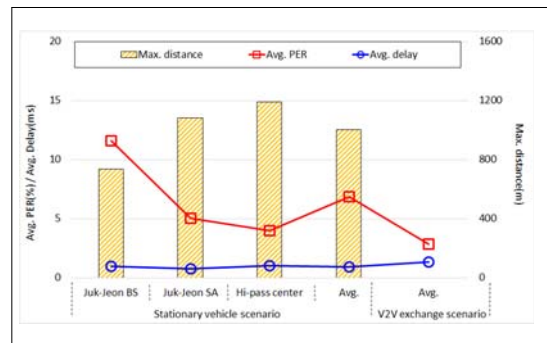
RSE 지점에 따라 최대통신거리와 평균PER 성능의 편차가 나타난다. 이는 실제 도로 환경에서는 각 RSE 지점별로 상이한 지형이나 도로시설물 등에 의해 LOS 확보 여건이 달라지기 때문이다.

또한 주행방향에 따라서도 최대통신거리와 평균

PER 성능의 편차가 나타난다. 주행방향에 따라 성능 차이가 발생하는 원인은 시험 시 주행한 차선의 위치와 각 RSE의 설치 위치에 의한 것으로 판단된다. 시험 주행 시 주행차선은 교통흐름과 안전을 고려하여 상/하행 모두 최 우측 차선인 5차선 가변차로로 주행하였으며, 테스트베드 상의 모든 RSE들은 상행선 우측 노변에 설치되어 있다.

이로 인해 발생하는 성능 차이의 원인은 다음 두 가지로 고려해 볼 수 있다.

- 빔패턴
  - RSE안테나는 3-패치 구조로 이루어져 있으며, 안테나 빔패턴 상 5차선 주행 시 RSE 원거리에서는 주로 주 빔패턴이 아닌 부 빔패턴으로 통신되며, 신호가 약한 부 빔패턴이 주변시설물 및 차량 등의 영향으로 신호 감쇠 현상을 보다 강하게 겪을 수 있다.
- LOS(Line Of Sight) 확보 측면
  - RSE 설치 위치와 주행차량의 위치를 고려해 보면, 상행차선 주행 시 하행차선에 비해 도로시설물 및 주변차량에 의해 LOS 확보가 어려울 수 있다.



<Fig. 14> V2V communication performance

이와 같이 각 RSE 지점별 및 주행방향 별 성능 차이가 발생하는 이유는 설치지점에 따른 LOS 확보 여건의 차이가 발생하기 때문으로, RSE 설치 시에는 이러한 부분을 고려할 필요가 있다.

<Fig. 14>는 V2V 서비스에 대한 시험 결과를 나타낸다. 고정차량 V2V 메시지 전송 시나리오의 경우, 최대통신거리 약 1km, 평균통신지연 0.89msec,

평균 PER 6.87%로 양호한 성능을 보이고 있다. 다만, 고정차량이 정차된 지점의 지형 여건에 따라 성능 차이는 발생하고 있다. V2V 메시지 교환 시나리오의 경우, 주행차량은 서로 근접하여 이동하므로 최대통신거리 결과는 큰 의미가 없다. 평균통신지연은 1.35msec, 평균PER은 2.83%로 전 구간에 걸쳐 양호한 성능을 보인다.

### 3. 비공용도로 - 공용도로 테스트베드 성능 비교

본 절에서는 비공용도로와 공용도로에서 측정된 V2X 통신성능을 비교한다. 공용도로는 비공용도로와 다르게 도로의 기하구조나 지형의 굴곡, 도로시설물 및 주변차량 등으로 인해 LOS 확보가 어렵고 다중경로페이딩현상에 많은 영향을 받는다.

<Fig. 15-18>은 비공용도로 및 공용도로에서의 data rate별 구간PER 성능을 보이고 있으며 이를 통해 통신거리에 따른 PER 성능의 변화 및 차이를 확인할 수 있다. 그래프 상에 표시된 점은 각 거리에서 계산된 구간PER값이며, 실선은 각 구간PER들의 평균값의 추세를 표시함으로써 환경에 따라 편차가 발생하는 및 PER 값의 변화 추이를 쉽게 파악할 수 있도록 한다.

시험 결과에 따르면, 유효통신범위인 500m 통신거리 내에서, 비공용도로의 경우 매우 안정적으로 변화 없는 성능을 보인다. PER의 추세선은 고르게 표현되며 각 개별 PER성능 값 역시 추세선 근처에 분포되어 있다.

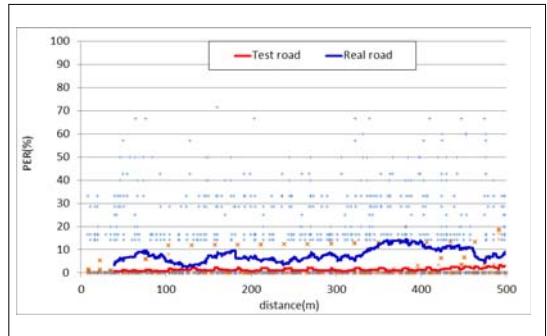
공용도로에서는 평균적으로는 양호한 PER 성능의 추세를 보이고 있으나, 다양한 외부환경요인으로 인하여 각 PER 값들의 편차가 심하게 나타난다. PER의 추세선은 공용도로에 비해 평균적으로 높은 PER값을 나타내고 있으며 선의 굴곡도 심하다. 각 개별 PER성능 값 역시 넓은 범위에 분포되어 나타나고 있다.

비공용도로 상에서는 12Mbps까지 매우 우수하고 안정적인 PER 성능을 보이며, 공용도로 상에서는 평균적으로는 양호한 성능을 보이지만 각 지점에서의 성능 편차는 크게 발생한다. 27Mbps에서는 두 경우 모두 통신성능이 현저히 낮아져 비교에 큰 의

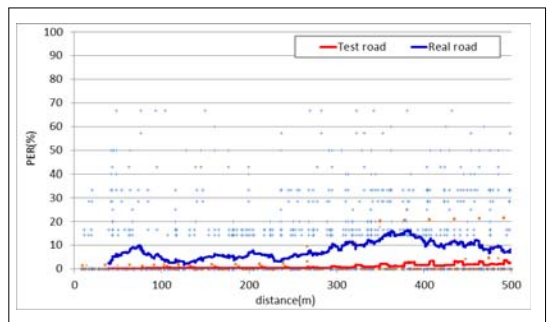
미는 없으며, 이동하는 차량에서의 V2X 통신에 적용하기에는 무리가 있는 것으로 판단된다. 27Mbps를 제외한 나머지 data rate에서는 data rate가 증가할수록 공용도로와 비공용도로 사이의 성능 차이도 증가함을 알 수 있다.

비교 결과와 같이 공용도로 상에서는 비공용도로와 다르게 도로의 기하구조나 지형의 굴곡, 도로시설물 및 주변차량으로 인해 LOS 확보가 어려우며, 이러한 점이 성능에 많은 차이를 주고 있음을 알 수 있다. 실제 주행환경에서는 주변 환경이 끊임없이 변화하여 LOS 확보 상황 및 변화를 특정 지을 수 없으므로 실 도로 환경에서의 통신성능을 추정하기 위해서는 다수의 시험을 반복하여 대량의 데이터를 기반으로 전반적인 추세를 확인하여야 한다.

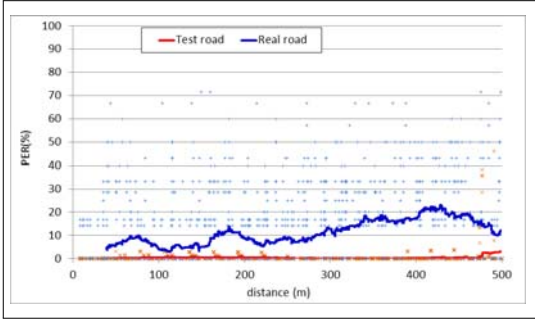
이 결과에 따라, 통신 시스템 구현 시 시험도로와 실제 도로 상에서는 이와 같은 성능의 차이 및 편차가 발생할 수 있음을 유념해야 하며, 실제 시스템 도입 시에는 실제도로 상에서의 성능 측정 결과를 바탕으로 시스템 요구사항 및 사양을 결정해야 한다.



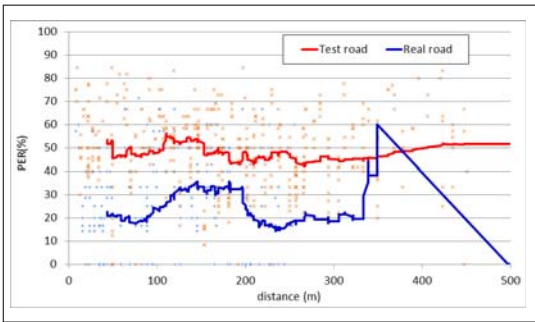
(Fig. 15) Interval PER vs. distance (3Mbps)



(Fig. 16) Interval PER vs. distance (6Mbps)



(Fig. 17) Interval PER vs. distance (12Mbps)



(Fig. 18) Interval PER vs. distance (27Mbps)

#### IV. 결 론

본 논문에서는 실제 도로 상에서 V2X 통신성능시험을 수행하기 위한 절차 및 방법을 제시하였으며, 이를 기반으로 비공용도로 테스트베드 및 공용도로 테스트베드 상에서 수행한 V2X 통신성능 시험 결과를 보였다.

제시된 시험 절차 및 방법을 활용하여 도로 상에서의 V2X 통신성능에 대한 기본적인 분석이 가능하며 해당 결과를 기반으로 시스템의 성능 수준과 개선점을 파악할 수 있고, 통신 시스템 성능에 관련된 인증 절차에도 활용될 수 있다. 또한 본 논문에서 다룬 성능지표 외에 추가적인 성능지표 정의 시에도 시험 시 저장된 로그를 다시 활용하여 다양한 분석 결과를 도출할 수 있다.

현재 제공 중인 C-ITS 서비스의 기본 메시지 전송파라미터인 메시지길이 150바이트, data rate 6Mbps를 기준으로 측정된 시험 결과는 양호한 수준으로, 현 단계에서의 C-ITS 서비스를 위한 통신

성능을 충분히 확보한 것으로 판단된다. 국내에서는 최대통신거리 1km, 평균통신지연 100msec, 평균 PER 10%를 기본 V2X통신성능지표 목표로 삼고 있으며, 시험 결과 성능 목표를 충분히 만족함을 확인할 수 있었다.

비공용도로 시험 결과, 최대통신거리는 I2V 1.8km, V2V 930m가 측정되었으며, 평균PER은 I2V 0.39%, V2V 0.51%가 측정되어 매우 우수한 성능을 보였다. 또한 유효통신 구간 내에서 주행 시 최대 평균 Throughput은 약 10Mbps로 측정되었다. 서비스 시나리오를 기반으로 한 공용도로 시험 결과, 최대통신거리 I2V 평균 1.7km, V2V 평균 1km, 평균통신지연 I2V 0.8msec, V2V 1.35msec, 평균PER I2V 7.63%, V2V 2.83%가 측정되어 양호한 성능을 보였다.

실험 결과에 따라 비공용도로 및 공용도로 테스트베드에서 모두 기본적인 성능을 만족함을 알 수 있었으나, 비공용도로와 공용도로 사이에는 지형지물이나 도로 구조, 도로시설물 등으로 인한 LOS 확보 여건 등의 차이로 성능의 편차가 발생하는 것으로 나타났다.

또한 실제 도로 환경에서 다양한 전송파라미터별 통신성능을 확인함으로써 향후 V2X 기반 서비스 설계 시, 현실성 있는 시스템 요구사항 및 사양을 도출하기 위한 레퍼런스 데이터를 확보하였다.

향후에는 보다 다양한 환경 파라미터들을 접목하여 도로에서 발생할 수 있는 다양한 상황에 대한 통신성능 검증을 수행함으로써, 보다 신뢰성 있고 포괄적인 성능검증 결과를 확보할 필요가 있다.

#### REFERENCES

- [1] IEEE 802.11p : Wireless Access in Vehicular Environments(WAVE), July, 2010.
- [2] IEEE 1609.0 : IEEE Guide for Wireless Access in Vehicular Environments(WAVE) - Architecture, Mar., 2014.
- [3] IEEE 1609.2 : IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments(WAVE) - Security Services for Applications and Management Messages, April, 2013.

- [4] IEEE 1609.3 : IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments(WAVE)–Networking services, Dec., 2010.
- [5] IEEE 1609.4 : IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments(WAVE)–Multi–channel operation, Dec., 2010.
- [6] ITS Korea(2015), Final Report for 2–1 *SMART Highway Study*, ISBN 979–1195526352, MOLIT Press.
- [7] KETI(2015), Final Report for 2–2 *SMART Highway Study*, ISBN 979–1195526376, MOLIT Press.
- [8] Jin G. D., Kim S. T., Lee S. Y., Kim C. G. and Park J. H.(2015), “A Study on the Operational Results of SMART Highway Test–bed,” *The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 14, no. 4, pp.27–39.
- [9] KEC(2015), Final Report for 4–2 *SMART Highway Study*, ISBN 979–1195529117, MOLIT Press.
- [10] USDOT(2014), *DSRC Roadside Unit(RSU) Specifications Document*, p.40.
- [11] USDOT(2014), *5.9GHz DSRC Vehicle Awareness Device Specification*, p.63.
- [12] SAE J2735 : Dedicated Short Range Communications(DSRC) Message Set Dictionary, p. 272, Nov., 2009.
- [13] SAE J2945–1 : On–Board System Requirements for V2V Safety Communications, p. 67, March 2016.
- [14] JPerf, <https://sourceforge.net/projects/jperf/>, 2016.07.01.

저자소개



정 한 균(Jung, Han–Gyun)  
 2005년 3월~2007년 2월 : 한국항공대학교 석사(정보통신공학전공)  
 2013년 한국항공대학교 박사과정 수료(정보통신공학전공)  
 2008년 4월~현재 : 전자부품연구원 모빌리티플랫폼연구센터 선임 연구원  
 e–mail : junghg@keti.re.kr



임 기 택(Lim, Ki–Taeg)  
 1994년 3월~1996년 2월 : 한양대학교 석사(전자공학전공)  
 2013년 한양대학교 박사과정 수료(전자컴퓨터통신공학전공)  
 1996년 3월~현재 : 전자부품연구원 모빌리티플랫폼연구센터 센터장  
 e–mail : limkt@keti.re.kr



신 대 교(Shin, Dae–Kyo)  
 1998년 3월~2000년 7월 : 아주대학교 석사(전자공학전공)  
 2010년 고려대학교 박사과정 수료(전자전기공학전공)  
 2000년 8월~2003년 11월 : eMDT 주임연구원  
 2003년 12월~현재 : 전자부품연구원 모빌리티플랫폼연구센터 책임 연구원  
 e–mail : dukeshin@keti.re.kr



윤 상 훈(Yoon, Sang-Hun)  
1998년 한양대학교 공학석사 (전자공학전공)  
2008년 한양대학교 공학박사 (전자공학전공)  
2012년 7월~현재 : 전자부품연구원 모빌리티플랫폼연구센터 선임 연구원  
e-mail : shyoon11@keti.re.kr



진 성 근(Jin, Seong-Keun)  
2008년 2월~2010년 2월 : 한양대학교 석사(전자컴퓨터통신공학전공)  
2009년 12월~현재 : 전자부품연구원 모빌리티플랫폼연구센터 선임 연구원  
e-mail : skjin@keti.re.kr



장 수 현(Jang, Soo-Hyun)  
2009년 3월~2011년 2월 : 한국항공대학교 석사(전자공학전공)  
2011년 3월~2015년 8월 : 한국항공대학교 박사(전자공학전공)  
2015년 9월~현재 : 전자부품연구원 모빌리티플랫폼연구센터 선임 연구원  
e-mail : shjang@keti.re.kr



신 준 수(Shin, Joon-Soo)  
2002년 3월~2004년2월 : 서울대학교 석사(지반환경공학전공)  
2016년 3월~현재 : 서울대학교 박사과정(교통공학전공)  
2004년 4월~현재 : 한국도로공사 스마트하이웨이사업단 차장  
e-mail : halfwing27@ex.co.kr