

철도 WAVE 통신을 위한 WAVE 패킷 전송방법

조봉관¹, 류상환¹, 김금비¹, 김용호^{2*}

¹한국철도기술연구원, ²한국교통대학교 철도전기전자공학과

WAVE Packet Transmission Method for Railroad WAVE Communication

Bong-Kwan Cho¹, Sang-Hwan Ryu¹, Keum-Bee Kim¹, Ronny Yongho Kim^{2*}

¹Korea Railroad Research Institute,

²Korea National University of Transportation.

요약 본 논문에서는 Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) 통신을 철도통신에 적용하였을 때 사용할 수 있는 효과적인 패킷 전송 방법을 제안하였다. WAVE 통신은 무선랜에 기초한 통신으로 이동체 통신에 적합하도록 개발된 통신방법으로 Intelligent Transport System (ITS)에 응용하도록 많은 연구가 이루어져 왔다. 철도도 주요 교통수단의 하나로 WAVE를 이용하면 현재 무선랜 시스템을 이용한 Communication Based Train Control (CBTC)를 포함한 많은 서비스들의 성능을 개선하고 여러 시스템으로 분산되어 있는 서비스들을 WAVE로 통합할 수 있다. 하지만, WAVE를 철도에 사용하기 위해서는 해결되어야 하는 문제점이 존재한다. 가장 단순한 구조인 Single-PHY WAVE는 제어채널(Control Channel, CCH)와 서비스채널(Service Channel, SCH)을 50ms씩 번갈아가며 통신을 수행한다. 철도 통신은 주로 지연에 민감한 패킷들이 많이 존재하는데 이러한 동작에서는 성능 열화가 발생할 수 있다. 본 논문에서는 현재 WAVE 통신 방법을 상세히 분석한 후 문제점을 도출하고 이러한 문제점을 철도 WAVE 환경에서 해결할 수 있는 새로운 패킷 전송 방법을 제안한다. WAVE 전송 성능을 수학적 모델링을 하여 철도 통신의 요구사항을 만족하는지 여부를 확인하였다.

Abstract In this paper, an efficient Wireless Access in Vehicular Environment (WAVE) packet transmission scheme for railroad communication is proposed. WAVE communication is a wireless local area network (WLAN) based communication and it is developed to be suitable for vehicular communication. There has been a lot of study on WAVE's applicability to Intelligent Transport System (ITS). As one of main transportation methods, by using WAVE, quality of railroad communication including WLAN based Communication Based Train Control (CBTC) can be enhanced and variety of railroad communication systems can be integrated into WAVE. However, there are technical challenges to adopt WAVE in railroad communications. For the simplest single-PHY WAVE, time division alternation of 50ms between Control Channel (CCH) and Service Channel (SCH) is required. Since there are delay sensitive railroad traffic types, alternation operation of CCH and SCH may cause performance degradation. In this paper, after identifying a couple of problems based on detailed analysis, a novel packet transmission scheme under railroad environment is proposed. In order to verify if the proposed scheme meets the requirement of railroad communication, WAVE transmission is mathematically modeled.

Keywords : IEEE 802.11, IEEE 1609, ITS, Railroad Communication, WAVE

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

*Corresponding Author : Ronny Yongho Kim(Korea National University of Transportation)

Tel: +82-70-8855-1662 email: ronnykim@ut.ac.kr

Received June 29, 2015

Revised September 1, 2015

Accepted October 8, 2015

Published October 31, 2015

1. 서론

Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE)는 IEEE 1609 계열 표준들과[1,2,3,4] IEEE 802.11p [5]로 구성된 통신방법으로 이동체 무선 통신에 적합한 표준이다. WAVE표준은 Vehicle to Vehicle (V2V) 통신과 Vehicle to Infrastructure (V2I)통신을 모두 지원하고 있다. 이를 위해 IEEE 802.11p 표준은 기본 IEEE 802.11 표준에 V2V, V2I를 지원하기 위한 이동체 통신 개정 사항들을 포함하고 있다.

WAVE는 Dedicated Short Range Communication (DSRC) [6-7]용으로 개발이 되어 고속도로 과금용으로 사용되고 있다 [8]. 도로 교통에서는 Intelligent Transportation Service(ITS)를 구현하기 위한 방안으로 WAVE를 이용한 다양한 방법들이 연구 중이다. 그 중 대표적인 것이 미국의 IntelliDrive 프로젝트[9-10]와 유럽 Europe Union (EU)의 Global System for Telematics (GST) [11]이다. IntelliDrive는 V2V, V2I를 위한 통신 인프라 시스템을 구축하여 이동성(mobility)와 안전성(safety)을 보장하기 위한 프로젝트이다. GST는 저렴한 장치 공급을 통한 텔레매틱스의 저변확대를 도모하기 위해 개방형 구조 플랫폼 기반의 시스템을 구현하는 프로젝트이다. 이 이외에도 Cooperative Vehicle-Infrastructure Systems & services(CVIS) 프로젝트, COOPERS 프로젝트 등 도로교통과 관련해서는 많은 연구들이 진행되었다. 하지만 철도교통을 ITS 관점에서 진행한 연구는 찾아보기 힘들며 특히 WAVE를 철도에 적용하기 위한 시도는 전무한 상태이다.

본 논문은 WAVE를 철도에 적용하기 위한 연구이며 철도의 특성을 고려하였을 때 WAVE가 효과적으로 통신할 수 있는 방법을 제안하였다. 현재 도로 교통에 적합하도록 설계되어 있는 WAVE가 철도에 적용되기 위해서는 해결되어야 하는 문제점들이 존재한다. 가장 단순한 구조인 Single-PHY WAVE는 제어채널(CCH)와 서비스 채널(SCH)를 50ms씩 번갈아가며 통신을 수행한다. 철도 통신은 주로 지면에 민감한 패킷들이 많이 존재하기 때문에 이러한 통신 방법은 철도 통신에서 성능 열화가 발생할 수 있다. 본 논문에서는 현재 WAVE통신 방법을 상세히 분석한 후 문제점을 도출하고 이러한 문제점을 철도 WAVE 환경에서 해결할 수 있는 새로운 패킷 전송 방법을 제안하려 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 철도 WAVE통신을 설계하기 위해 현재 WAVE통신의 기술적인 사항들을 살펴보고 현재 WAVE통신이 가지고 있는 문제점들을 살펴본다. 또한 WAVE통신에 적합한 채널 사용 형태를 제안하고 철도 우선 순위 서비스를 위해 가능한 기준을 제안한다. 3장에서는 철도 WAVE 통신 방법을 제안한다. 4장에서는 제안한 통신 방법의 성능을 상세히 분석, 평가하고 5장에서는 본 논문을 정리하기로 한다.

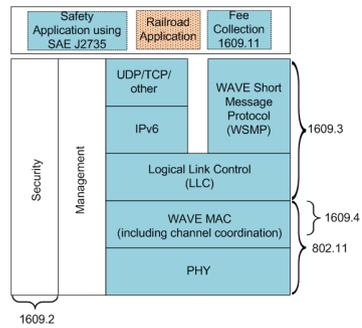


Fig. 1. WAVE Protocol Stack and its relevant standards [1]

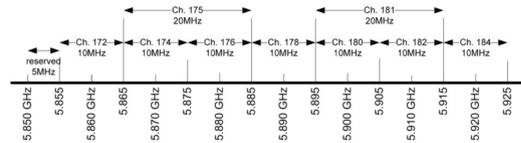


Fig. 2. WAVE Channel Allocation (FCC, U.S.A Case)

2. 철도 WAVE 통신 방법

Fig. 1은 WAVE 프로토콜 스택과 관련된 표준의 연관성을 보여주는 그림이다. 물리계층 (Physical layer, PHY)과 데이터링크 계층 (Medium Access Control, MAC)은 IEEE 802.11 기본 표준과 이를 보강한 IEEE 802.11p [5] 표준을 채용하고 있다. WAVE는 같이 여러 개의 채널을 alternation하면서 동작하도록 설계되어 있다. 이러한 Multi-channel 동작을 규정하기 위해서 WAVE MAC계층의 일부분의 동작을 IEEE 1609.4 [4] 표준에서 정의 하고 있다. Application계층에 속하는 부분들은 IEEE 1609.4 [3]에서 정의하고 있으며 신속한 접속을 위해 IEEE 802.11의 보안 절차를 사용하지 않기 때문에 별도로 IEEE 1609.2 [2]에서 보안 관련된 내용

을 정의하고 있다. WAVE 프로토콜은 IP 서비스와 WAVE Short Message Protocol (WSMP)를 모두 이용하는 구조로 되어있다.

미국 연방통신위원회인 Federal Communications Commission (FCC)는 WAVE를 위한 채널들을 Fig.2와 같이 10MHz 대역의 7개 채널을 할당하였다. Ch. 172와 Ch. 184는 safety 용으로 지정을 하고 있다. Ch. 174와 Ch. 176은 둘을 합쳐 Ch. 175로 20MHz로 사용하는 것이 가능하며 또한 Ch. 180과 Ch. 182를 합쳐 Ch. 181로 20MHz로 사용하는 것이 가능하다. 가운데 위치한 Ch. 178이 CCH로 사용되고 나머지 채널들은 SCH로 사용된다. CCH로는 WAVE Service Announcement (WSA)를 통해 어떤 서비스가 어떤 SCH로 전달될 것을 광고하기 때문에 CCH를 주기적으로 청취해야 한다. 따라서, IEEE 1609.4 표준에서는 Fig. 3에서와 같이 50ms 채널 간격으로 CCH와 SCH를 번갈아 청취하도록 정의하고 있다. CCH와 SCH의 시작 부분은 4ms의 보호간격(guard interval)로 구성된다.

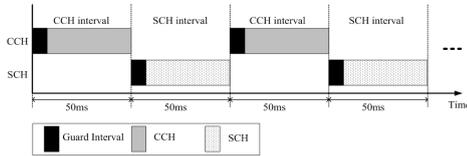


Fig. 3. WAVE Multi-Channel Allocation

철도 WAVE의 트래픽 우선순위 서비스를 제공하기 위해 IEEE 802.11p에 정의되어 있는 Enhanced Distributed Channel Access (EDCA)를 철도 traffic에 맞게 적용하면 된다. EDCA를 철도 WAVE에 적용하기 위해서는 WAVE에 사용할 철도 통신 Traffic들을 우선 선정하여야 한다. Traffic 종류는 CCH를 사용하는 Traffic과 SCH를 사용하는 Traffic으로 나눌 수 있다.

CCH를 사용하는 Traffic: WAVE에서 제어용으로 사용하는 Traffic 들, 예)WSA 등

SCH를 사용하는 Traffic: Safety 관련 Traffic, 철도 통신용 Traffic 들

이렇게 선정한 Traffic들을 EDCA의 Traffic Class에 철도통신 Traffic을 mapping하는데 Traffic 특성과 Vital/Non-vital 종류에 따라 mapping 할 수 있다. 다음은 제안하는 mapping의 기준이다.

AC_VO: Vital이면서 Voice이거나 1차 중요한 제어용 traffic

AC_VI: Vital 이면서 Video이거나 2차 중요한 제어용 traffic

AC_BE: Non-vital이면서 제어용이나 Voice나 Video가 아닌 traffic

AC_BK: 할당하지 않음

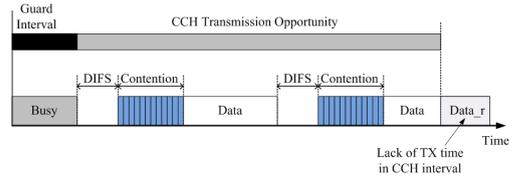


Fig. 4. Lack of data transmission time during CCH interval

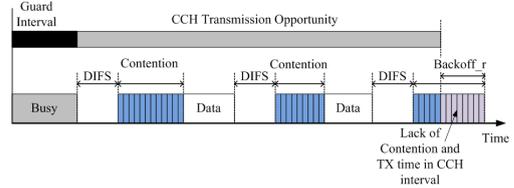


Fig. 5. Lack of contention and data transmission time during CCH interval

또한 고려해야 하는 것이 WAVE Multichannel 동작과 연계한 delay bound를 고려해야 한다. CCH와 SCH를 alternation 하는 동작 때문에 추가 delay가 발생하는데 이러한 multichannel 동작에 의한 채널 전환(alternation) delay를 고려한 delay bound가 고려되어야 한다. 또한 고려해야 하는 것은 많은 WAVE 단말이 존재할 시 동시 접속 사용자들의 경쟁(contention)에 의한 접속 지연이 충분히 traffic의 QoS를 만족하는지도 분석해 보아야 한다.

3. 채널 스위칭을 고려한 철도 WAVE 패킷 전송

Fig. 4와 Fig. 5는 CCH 구간 내에서 WSMP 데이터를 전송하고자 하는 User들이 다수여서 User들끼리 데이터 전송을 위한 경쟁을 하는 상황을 보여주는 그림들이다. Fig. 4는 경쟁에는 성공을 하였으나 전송하고자 하는 데이터를 보내기 위한 충분한 시간이 보장되지 못한 경우이다. 이 때 전송하지 못하고 남은 데이터를 Data_r

로 표기하기로 한다. Fig. 5는 경쟁을 하기 위한 Backoff 도중에 CCH 구간이 종료되어 경쟁을 제대로 수행하지 못한 경우이다. 이 경우 남은 Backoff 시간을 Backoff_r 이라 표기하기로 하자. 이러한 경우들을 위해 본 논문에서는 새로운 경쟁 규칙을 제시한다.

[규칙 1] Data_r을 다음 CCH 시작 후 DIFS 이후 경쟁 없이 전송

[규칙 2] Backoff_r을 다음 CCH 시작 후 DIFS 이후 Backoff 값으로 사용하여 경쟁

규칙 1은 경쟁을 통해 전체 전송할 수 있는 Transmit Opportunity (TXOP)를 획득하였으나 WAVE의 채널 alternation에 의해서 주어진 CCH 구간에 패킷을 완전히 전송하지 못한 것이다. 이러한 경우에 다음 CCH가 시작될 때 이전에 획득한 TXOP을 사용하는 것이므로 새로운 CCH 구간에서 virtual TXOP을 설정하는 것과 같은 효과를 가질 수 있다. 규칙 1의 적용을 위해 데이터는 두 가지 형태로 구성하여 전송 가능하다. 첫째는 오류 검출을 위한 Frame Check Sequence (FCS)까지 포함한 한 개의 MAC Packet Data Unit (MPDU)를 구성한 후 전송 시간이 허락하는 만큼 나누어 보내는 것이다. 이 때 MAC 헤더의 duration은 전체 전송 시간이 설정되어 전송된다. 두 번째 방법은 MAC Service Data Unit (MSDU)를 둘로 fragmentation하고 fragmentation을 표시한 MAC 헤더와 FCS를 독립적으로 구성하여 전송하는 것이다. 이 때 각 헤더에 설정되는 전송시간은 각 분할된 조각이 전송되는데 걸리는 시간이 설정된다.

규칙 2를 적용하기 위해서는 종래 무선랜이 backoff 중에 medium이 busy이면 backoff counter를 freeze했던 것을 동일하게 적용하면 된다. 이는 물리 계층에서 Carrier Sensing을 하는 Clear Chanel Assessment (CCA) 결과를 다른 채널인 SCH로 동작할 때는 Busy가 되도록 물리계층 (Physical Layer, PHY) 프리미티브 (Primitive)를 설정해 주면 된다. CCH interval이 종료되면 CCA결과 프리미티브를 이용하여 medium busy로 처리하여 backoff counter를 freeze하도록 한다. 규칙 2를 이용하게 되면 전체 전송에 걸리는 시간은 SCH로 동작하는 시간만 제외하면 하나의 채널로 수행하는 동작과 동일하게 된다. 규칙 2를 사용하지 않을 경우 backoff 중에 CCH 구간이 종료되면 backoff가 실패로 처리되고 다음번 CCH 구간에 새로운 backoff를 수행해야 한다. 패킷 전송을 위해 경쟁하는 사용자 수가 많을 경우 규칙 2

를 적용하지 않으면 시간이 지나도 전송을 하지 못하는 현상이 발생할 수 있다.

4. 성능 분석

제안한 방법들의 성능을 분석하기 위해서는 alternation을 하는 50ms동안 평균적으로 몇 명의 사용자가 경쟁하여 전송에 성공할 수 있는지는 알아야 한다. 이를 위해서 MAC 접속 지연을 측정해야 한다. 종래 연구에서 802.11의 MAC접속 지연을 모델링하기 위한 많은 연구가 있어 왔다. MAC 접속 지연에 대한 대표적인 연구로 마르코프 체인을 이용한 성능 모델링이 있다 [12]. [13]은 단지 재전송하는 회수만 고려했고 [14]는 1차원 마르코프 체인에 기반한 간단한 분석법을 사용했다. [15]는 renewal 이론에 기반한 분석 방법을 제시했다. 본 논문에서는 [16]에서 제시한 802.11 MAC 접속 지연 모델을 근거로 성능 분석을하기로 한다. [16]에서 제시한 MAC접속 지연 E[D]는 다음과 같은 수식 (1)로 나타낼 수 있다.

$$E[D] = r \sum_{i=0}^{K-1} p^i E[D^{(i)}] \quad (1)$$

$$= \frac{(1-p)}{(1-p^K)} \sum_{i=0}^{K-1} p^i \left\{ (t_{slot} + p \cdot t_{TX} \sum_{j=0}^i E[U^{(j)}] + i \cdot t_{TX}) \right. \\ \left. + (t_{DATA} + t_{DIFS}) \right\}$$

여기서 p 는 [12]에서 제안한 방법에 의한 전송한 패킷이 충돌할 확률이고 전송을 시도할 확률 τ 에 대한 함수로 다음 수식과 같이 나타낼 수 있다.

$$p = 1 - (1 - \tau)^{n-1} \quad (2)$$

Backoff를 통한 경쟁에 소요되는 시간은 Contention Window (CW)에서 하나의 값을 Uniform 확률로 선택하기 때문에 Uniform 확률변수로 표현 가능하고 i 번째 Backoff에 소요되는 시간 U^i 는 다음과 같이 나타낼 수 있다. 무선랜 표준에서 정한 바와 같이 Backoff는 m 번째까지는 CW를 계속 증가 시키고 $m+1$ 번째부터는 최대 CW를 유지한다.

$$U^{(i)} = \begin{cases} \text{Uniform}(0, \lambda^i W - 1), & i = 0, \dots, m-1 \\ \text{Uniform}(0, \lambda^m W - 1), & i = m, \dots, K-1 \end{cases} \quad (3)$$

π_i 는 정상 상태(Steady State)에서 i 번째 Backoff 상태에 들어갈 상태 빈도수로 정의하고 이는 전송을 시도할 확률 τ 와 패킷이 충돌할 확률 p 와 연관이 있으며 [14]에서는 다음과 같이 유도하였다.

$$\pi_i = (1-p)p^i(1-p^K)^{-1} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{\tau} &= \sum_{i=0}^K \pi_i E[U^{(i)}] \quad (5) \\ &= \frac{(1-p)W(1-(\lambda p)^m)}{2(1-p^K)(1-\lambda p)} + \frac{\lambda^m W(p^m - p^K)}{2(1-p^K)} - \frac{1}{2} \end{aligned}$$

Table 1. Simulation Parameter

Parameter	Value
Data Preamble (802.11p)	32us
Max retries	10
Fixed MCS (QPSK, 1/2)	6 Mbps
CWmin	15
MSDU length	300, 600, 900, 1200, 1500 bytes
Slot Time	13us
SIFS length	16us
DIFS length	58us

(2), (4), (5)를 이용하면 충돌 확률 p 를 구할 수 있다. MAC 메시지 전송 지연 D 는 충돌이 발생하는 다음과 같은 하위상태(substate)들로 나눌 수 있다.

$$D = t_{DIFS} + D^{(i)} + t_{DATA}, \quad 0 \leq i \leq K-1 \quad (6)$$

$$D^{(i)} = \sum_{j=0}^i B_i^{(j)} + i \times t_{TX}$$

여기서 $t_{TX} = t_{DATA} + t_{SIFS} + t_{ACK} + t_{DIFS}$ 이고 $B_i^{(j)}$ 를 간단히 표현하기 위해 i 를 생략한 $B^{(j)}$ 은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$B^{(j)} = U^{(j)} \times (t_{slot} + t_{TX}) \quad (7)$$

수식 (2) ~ (7)을 이용하면 (1)에 나타나 있는 $E[D]$ 를 구할 수 있다.

전송하는 패킷인 MAC Packet Data Unit (MPDU) 크기는 다음의 수식 (8)로 나타낼 수 있다.

$$MPDU\ size = MSDU + MAC\ header + padding + service + tail \quad (8)$$

MPDU의 전송 시간은 다음과 같은 수식으로 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} MPDU\ duration &= \text{ceil}((FrameLength * 8) / rate / OFDMsymbolduration) \\ &\quad * OFDMsymbolduration + PHY\ Header \quad (9) \end{aligned}$$

MAC접속 지연 $E[D]$ 를 이용한 시뮬레이션을 위한 파라미터는 Table 1과 같다. 수학적 모델링한 수식과 Table 1의 파라미터를 이용하여 우선 제안한 규칙 1을 따를 때 이득을 살펴보았다. 제안한 규칙 1

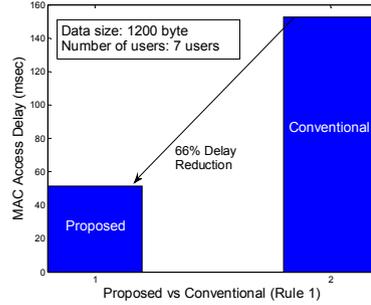


Fig. 6. MAC access delay comparison between the proposed scheme (Rule 1) and the conventional scheme

을 따르지 않을 경우에는 전송하던 데이터는 실패로 간주될 것이므로 새로운 CCH에서는 새로이 경쟁을 수행해야 한다. 전송하는 데이터 크기 1200 byte이고 동시 전송하는 사용자가 7명인 경우의 결과를 Fig. 6에 도식해 놓았다. Fig. 6에서 볼 수 있는 것과 같이 제안한 규칙 1을 사용하였을 때 66%의 MAC 접속 지연시간 절감 효과를 얻을 수 있었다. 실험은 특정 조건에서 수행이 되었으나 이는 이득을 보여주기 위한 한 예일 뿐이며 다른 동시 전송 사용자 수와 데이터 크기에서도 CCH 구간에서 데이터가 전송이 완료되지 못한 경우에는 동일한 현상이 발생한다.

제안한 규칙 2를 따를 때 이득을 살펴보기 위해 동일한 파라미터를 사용하여 실험을 수행하였다. 실험을 통해 동시 전송 사용자 수가 증가함에 따라 CCH 구간인 50ms의 interval 내에 전송할 수 있는 패킷의 수를 측정하였다. 실험 결과를 보여 주는 Fig. 7에서 알 수 있는 바와 같이 작은 크기의 MPDU를 전송하는 경우에는 동시 접속 사용자가 10명정도 있어도 패킷을 한 개 이상 전송이 가능하나 MPDU 크기가 커질 경우에는 50ms에 한 개의 패킷 전송을 성공하기 위해서는 4명의 사용자까지만 지원이 가능함을 알 수 있다. 제안한 규칙 2를 따르지 않는다면 매번 CCH가 시작될 때 새로운 경쟁을 수행해야 하며 이전에 시도한 Backoff가 실패로 처리되므로 다음 CCH 구간에서 패킷 전송을 할 수 있는 가능성이 없어지게 된다. Fig. 7에서 보여 주는 것과 같이 동시 전송 사용자 수가 증가하면 주어진 CCH내에 한 개의 패킷도 전송하지 못하는 경우가 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 규칙 2를 적용하면 CCH 구간

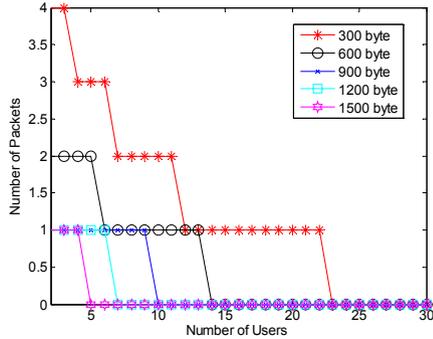


Fig. 7. Average number of packets can be transmitted in 50ms interval as number of users increases (without Rule 2)

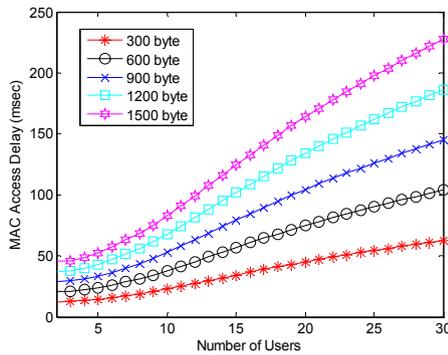


Fig. 8. MAC access delay as number of users increases (with Rule 2)

이 종료될 때 남은 Backoff 윈도우를 다음 CCH 구간에서 사용하기 때문에 Fig. 8에서 보여 주는 것과 같이 동시 전송 사용자 수가 증가함에 따라 MAC 접속 지연 시간은 증가하기는 하지만 결국은 전송에 성공할 수 있음을 알 수 있다. 제안한 규칙 2를 사용하지 않는다면 성공적인 패킷 전송을 하기 위해서는 동시전송 사용자 수를 제한해야 한다. 제안한 규칙 2를 사용한다하더라도 동시 전송 사용자 수가 증가함에 따라 증가하는 지연시간을 줄일 수는 없으므로 Application에 따라서는 QoS에 맞게 동시전송 사용자 수를 제한해야 한다.

5. 결론

본 논문에서는 철도 WAVE 통신에서 효과적인 패킷

전송 방법을 제안하고 수학적 모델링과 시뮬레이션을 통해 성능을 검증하였다. 도로 교통에서 많은 연구가 이루어진 WAVE 통신을 지연 시간에 민감한 패킷이 많은 철도 통신에 사용하기 위해 사용 가능한 다중 채널 사용 방법을 제안하였으며 철도 패킷들 간의 우선 순위 서비스를 제공하기 위한 방안도 제안하였다. 또한 CCH와 SCH가 교대로 사용하는 제약 조건을 극복하기 위한 패킷 전송 방법을 제안하였다.

본 논문에서 제안하는 방법들을 사용하면 효과적인 철도 WAVE 통신망 구현이 가능하며 이를 통해 효과적인 WAVE 통신 서비스를 제공할 수 있기 때문에 LTE-R 기반의 철도 통신망과의 융합도 용이하게 할 수 있을 것이라 기대한다.

References

- [1] IEEE Std 1609.1-2006 - IEEE Trial-Use Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Resource Manager, 13 Oct 2006. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/IEEESTD.2006.246485>
- [2] IEEE Std 1609.2-2013 - IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments—Security Services for Applications and Management Messages, 26 Apr 2013.
- [3] IEEE Std 1609.3-2010 - IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Networking Services, 30 Dec 2010
- [4] IEEE Std 1609.4-2010 - IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Multi-channel Operation, 7 Feb 2011.
- [5] IEEE 802.11p-2010 - Wireless LAN Medium Access Control(MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 6: Wireless Access in Vehicular Environments, IEEE Standards Association, 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/IEEESTD.2010.5514475>
- [6] http://standards.ieee.org/develop/wg/1609_WG.htm
- [7] DSRC Implementation Guide - A guide to users of SAE J2735 message sets over DSRC. SAE International, 2010
- [8] IEEE Std 1609.11-2010 - IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments—Over-the-Air Electronic Payment Data Exchange Protocol for Intelligent Transportation Systems (ITS), 9 Jan 2011.
- [9] <http://www.its.dot.gov/>
- [10] W. Fehr, "IntelliDriveSM Program Overview", Transpo 2010, 13 Dec. 2010.
- [11] <http://www.makewave.com/site/en/showroom/gst.shtml>
- [12] Bianchi, G., Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function, IEEE J. Sel. Areas Commun., 18, 535 - 547, 2000

DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/49.840210>

- [13] Wu, H., Peng, Y., Long, K., Cheng, S., and Ma, J., Performance of reliable transport protocol over IEEE 802.11 wireless LAN: analysis and enhancement, in Proc. IEEE INFOCOM 2002., 599 - 607. 2002
- [14] Kwak, B.-J., Song, N.-O., and Miller, L. E., Performance analysis of exponential backoff, IEEE/ACM Trans. Networking. 13, 343 - 355, 2005.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TNET.2005.845533>
- [15] Kumar, A., Altman, E., Miorandi, D., and Goyal, M., New insights from a fixed point analysis of single cell IEEE 802.11 WLANs, in Proc. IEEE INFOCOM 2005. 1550 - 1561. 2005
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/infcom.2005.1498438>
- [16] Sakurai, T., and Vu, H. L., MAC Access Delay of IEEE 802.11 DCF. Wireless Communication, 6, 1702 - 1710. 2007.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TWC.2007.360372>

조 봉 관(Bong-Kwan Cho)

[정회원]



- 1995년 3월 : 일본게이오대학교 대학원 계측공학과 (공학석사)
- 2011년 2월 : 한양대학교 전자통신 전과공학과 (공학박사)
- 1996년 12월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원
- 2014년 5월 ~ 현재 : 국토교통부 철도기술전문위원

<관심분야>

철도통신, 열차제어, 무인경전철

류 상 환(Sang-Hwan Ryu)

[정회원]



- 1987년 2월 : 아주대학교 대학원 제어공학과 (공학석사)
- 2009년 8월 : 성균관대학교 대학원 전자전기공학과 (공학박사)
- 1993년 5월 ~ 1997년 12월 : 한국고속철도건설공단 선임연구원
- 1997년 12월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 책임연구원

<관심분야>

열차제어, 도시철도

김 금 비(Keum-Bee Kim)

[정회원]



- 2011년 2월 : 서울과학기술대학교 산업대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2014년 3월 ~ 현재 : 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도전기-신호공학과 박사과정 재학중
- 2014년 3월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 학연석박사과정 연구생

<관심분야>

철도신호통신, 정보통신

김 용 호(Ronny Yongho Kim)

[정회원]



- 2004년 2월 : 연세대학교 전기전자공학부 (공학석사)
- 2010년 2월 : 연세대학교 전기전자공학부 (공학박사)
- 1998년 4월 ~ 2010년 8월 : LG전자 책임연구원
- 2010년 9월 ~ 2012년 1월: 경일대학교 조교수
- 2012년 2월 ~ 현재 : 한국교통대학교 부교수

<관심분야>

정보통신, 철도통신, ITS