

자율주행 열차의 혼잡 상황 통신을 위한 분산형 UORA 기법

Distributed UORA Scheme for Autonomous Train Communication in Congested Environment

안우진¹ · 김용호^{2*}

¹한국철도기술연구원

²한국교통대학교 철도전기전자공학과

Woojin Ahn¹ · Ronny Yongho Kim^{2*}

¹Korea Railroad Research Institute, Gyeonggi-do 16106, Korea

²Department of Railroad Electrical & Electronic Engineering, Korea National University of Transportation, Gyeonggi-do 16106, Korea

[요 약]

열차 자율주행은 제한된 열차 선로의 용량을 증가시키기 위한 미래 철도 기술이며, 무선통신의 안정성은 열차간 간격 감소에 있어서 핵심적인 역할을 한다. 본 논문에서는 자율주행열차 통신을 위한 혼잡 환경에서의 전송 기법을 제안하였다. 제안하는 분산 UORA (uplink OFDMA (orthogonal frequency division multiple access) random access) 기법은 최신 6세대 무선랜 표준인 IEEE 802.11ax의 TUA (triggered uplink access) 기법과 UORA 기법을 분산적으로 적용하여 혼잡도가 매우 높은 승강장 진입 환경에서, 승강장 및 차량의 센서가 효율적으로 차량 및 승강장의 수집 장치에게 전달할 수 있도록 한다. 본 논문의 실험 결과에 따르면, 제안하는 기법은 기존 EDCA (enhanced distributed channel access) 방식 대비 혼잡 상황에서 효과적으로 전송 성공률을 향상 시키는 것으로 나타났다.

[Abstract]

Autonomous train is investigated to increase the capacity of railroad, and the reliability of wireless communication plays a critical role in terms of decreasing the inter-train distance. In this paper, we propose a transmission scheme for autonomous train communication in highly congested environment. The proposed scheme, namely distributed uplink orthogonal frequency division multiple access (OFDMA) random access (UORA), applies the triggered uplink access (TUA) and the UORA, introduced in the sixth generation WLAN standard, IEEE 802.11ax, for communication devices on vehicle and platform in a distributed manner. The simulation results show that the proposed scheme efficiently improves the packet transmission success rate in highly congested channel conditions compared to the conventional enhanced distributed channel access (EDCA) transmission scheme.

Key word : Automatic train operation, Wireless LAN, Triggered uplink access, Uplink OFDMA random access.

<https://doi.org/10.12673/jant.2016.23.6.542>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 28 November 2019; Revised 30 November 2019
Accepted (Publication) 27 December 2019 (30 December 2019)

*Corresponding Author; Ronny Yongho Kim

Tel: +82-31-460-0571

E-mail: ronnykim@ut.ac.kr

I. 서론

인구의 도시 집중화가 가속되는 현 시대의 상황에서 철도 수송 능력을 향상시키는 것은 도시교통분야의 주요 관심사이다 [1].

과거 선형 열차와의 간격을 유지하기 위해 선형 열차의 정지 상태를 가정하여 긴 고정 폐색 구간을 사용했던 열차제어시스템은 무선통신의 도입, 각종 센서들의 발달 그리고 정밀한 열차 자동제어기술이 융합되어 선형 열차의 이동성을 고려하여 이동폐색 구간을 유지하는 방향으로 진화하고 있다 [2].

미래의 자율주행 열차제어시스템은 궤도회로 및 신호기와 같은 물리적인 형태의 정보전달에서 벗어나, 이동 권한, 속도 프로파일, 측위 정보 등 열차제어에 필수적인 모든 정보들이 무선통신을 통해서 이루어진다 (CBTC; communication based train control). 따라서 무선통신이 안정적으로 정보를 전달하지 않을 경우, 긴급 제동과 같은 상황이 발생하여 선로 용량을 감소시키거나 최악의 경우 추돌 사고까지 발생할 수 있다. 특히 승강장은 이동 폐색 시 열차 간 간격이 가장 근접하며, 정차제어와 PSD (platform screen door) 제어와 같이 승객의 안전과 직결되는 기능을 수행하기 때문에 무선 통신의 안정성 및 효율에 대한 검증이 면밀하게 검토되어야 한다.

현재 국내 다수의 노선에서는 미국 전기전자엔지니어협회인 IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers)의 802.11 기반의 통신기술이 열차제어를 위한 통신기법으로 사용되고 있다 [3],[4]. IEEE 802.11은 비면허대역 표준으로 장비의 설치 및 유지 보수가 간편하며 터널과 같은 고립된 공간에서 간섭 없이 효율적인 통신을 하는 것이 가능하다. 그러나 승강장의 경우 많은 수의 센서 및 주변기기들과 승객용 무선랜 기기들이 혼재함에 따라 간섭의 영향이 크게 증가할 수 있다.

특히 도시철도 자율주행에서는 가상 연결 기술을 통해 물리적으로 분리된 량의 열차들이 수 미터 수준의 거리를 유지하면서 상황에 따라 유연하게 편성 구조를 변화할 수 있다 [5]. 이 경우, 가상 연결된 열차가 승강장에 진입할 시에는 센티미터 단위의 측위 정보, 차량의 실시간 속도, 감속 정보 그리고 승강장의 각종 센서들의 측정 정보들을 매우 빠른 주기로 주고받으면서 가상연결 자율주행 열차의 사고의 위험을 줄이는 과정이 필요하다.

본 논문에서는 최신 6세대 무선랜 표준인 IEEE 802.11ax [5]의 TUA (triggered uplink access) 기법과 UORA 기법을 분산적으로 적용하여 승강장 및 차량의 센서가 효율적으로 차량 및 승강장의 수집 장치에게 전달할 수 있게하는 전송 기법을 제안한다.

II. 제안하는 분산 UORA 기법

무선랜 기술은 비면허 대역을 기반으로 한 기술이기 때문에,

전송 대역을 주변의 다른 무선랜, bluetooth, zigbee 등의 다른 통신 표준을 따르는 기기들과 공유해야 한다. 따라서 백오프 과정을 통해 다른 기기들의 자원 점유 여부를 먼저 확인하고, 유휴할 경우 경쟁을 통해서 채널을 접속하며, 제한된 전송 기회 (TXOP; transmit opportunity) 시간내에 연속적인 전송 시퀀스로 모든 전송을 수행해야 한다. 이와 같은 특성으로 인하여 무선랜에서는 특정 시간을 지정하여 여러 단말의 동시 전송을 유도하는 스케줄링 기반 기법의 사용이 어려웠다.

단말들의 프로세싱 능력의 향상과 더불어 IEEE 802.11ax에서는 하나의 TXOP 내에서 다수 단말의 스케줄링과 동시 전송을 수행하는 TUA 기법이 제안되었다. TXOP을 획득한 단말 (TXOP holder)은 상향 전송 프레임 길이, 형식, 시간 동기화 정보, 자원할당 정보 및 파워 컨트롤 정보 등이 포함 TF (trigger frame)를 전송하며, TF 수신에 의해 자원을 할당받은 단말들은 SIFS (short inter-frame spacing)의 시간 후에 OFDMA의 형태로 상향 프레임을 전송한다. 따라서 상향 프레임을 전송하는 단말은 별도의 EDCA 과정을 수행하지 않을 수 있다.

제안하는 자율주행 열차의 승강장 진입 상황에서는 가상 연결 열차들간의 주행 정보 공유 뿐만 아니라, 열차의 각 량들이 승강장에 들어선 다수의 센서들을 지나치면서 정보를 수집해야 하며, 승강장의 수집장치들도 해당 정보들을 수집하여 관제 센터에 전달해야 한다. 이 경우, 많은 수의 단말들이 일대일 통신을 하는 것은 비효율적일 수 있으므로, 각 장비들은 정보들을 방송 프레임 형태로 주변 단말들에게 전송하는 것이 효율적일 수 있다.

이처럼 다수 단말이 빠른 주기로 채널 접속을 시도하는 경우 기존의 EDCA를 이용할 경우 채널 경쟁 오버헤드가 급격하게 증가하기 때문에 TUA와 같은 스케줄링 기법을 이용하는 것이 효과적이다. 그러나 열차가 이동하면서 수시로 데이터를 주고받는 기기들이 달라지기 때문에 고정적인 스케줄링이 불가능할 수 있다.

상기한 문제를 해결하기 위한 방법으로 IEEE 802.11ax에서는 UORA 기법을 제안하였다. UORA에서는 TXOP 획득 단말이 TF를 전송할 시에 스케줄링하고자 특정 자원 단위 (RU; resource unit)들을 임의 접속 형태로 지정하여 전송할 수 있다 (TF-R). 따라서 TF-R을 수신한 주변 단말은 임의 접속이 허용된 RU 중 하나를 임의로 선택하여 전송한다.

이 때, 임의 접속 경쟁의 과열을 막기 위하여 각 단말들은 임의 접속 카운터 (OBO; OFDMA backoff counter)를 관리한다. OBO는 단말이 특정 정수 범위 (0, OCWmin) 내에서 임의로 선택하는 정수이며, TF-R 수신 시에, 해당 TF-R에서 지시하는 임의 접속 RU의 개수만큼 OBO를 감소시키고, OBO가 0이 된 경우에 한해서 해당 TF-R에 응답하여 임의접속 TUA를 실시한다.

제안하는 기법, 분산 UORA (D-UORA; distributed UORA),에서는 통신에 참여하는 모든 단말들이 EDCA를 이용하여 채널 접속을 시도하지만, TXOP을 획득할 시 TF-R을 전송하여

	TF-R (STA 1)		TF-R (STA 3)	
	Sched. RU (STA 1)	RA RU (STA 2, 3) Collision	Sched. RU (STA 3)	RA RU (STA 2)
STA 1 (5,2,2)	→ (0,2,2)	→ (13,2,1)	→ (9,2,1)	→ (9,0,0)
STA 2 (13,3,3)	→ (8,3,3)	→ (8,0,2)	→ (4,2,2)	→ (4,0,1)
STA 3 (9,3,2)	→ (4,3,2)	→ (4,0,1)	→ (0,6,1)	→ (idle,6,0)
STA 4 (11,1,4)	→ (6,1,4)	→ (6,0,3)	→ (2,7,3)	→ (2,4,3)
STA 5 (12,2,2)	→ (7,2,2)	→ (7,0,1)	→ (5,5,1)	→ (3,2,1)

(x, y, q) x: BO, y: OBO, z: buffered Data

그림 1. 제안하는 분산 UORA의 전송 시퀀스 예시

Fig. 1. Example of the proposed distributed UORA transmission sequence.

EDCA 수행 중인 주변 단말들이 UORA TUA로 전송하도록 유도하여 채널 접속 효율을 높이는 것을 제한한다. 이 때, 접속하는 전 채널 중에서 하나의 RU는 자신을 위한 스케줄링 RU로 할당하며, 나머지 모든 RU에 대해 임의의 접속을 위한 RU로 지시하여 TF-R을 전송한다.

분산 UORA에서는 승강장 및 열차 별 센서 및 통신 기기의 개수는 유사하다는 가정하에 고정된 경쟁 윈도우 및 OCWmin 값을 사용하는 것을 가정한다.

EDCA 백오프 중에 다른 단말에 의해 UORA에 참여한 경우, UORA 전송 참여 여부는 단말의 백오프 카운터 (BO)에 영향을 미치지 않는다. 따라서 UORA 전송 후에 기존에 사용 중이던 BO 값을 이용하여 다시 EDCA 동작을 재개할 수 있으며, BO가 0이 되었을 시 직접 UORA 동작을 유도할 수 있다. 제안하는 분산 UORA 기법의 예시는 그림 1과 같다.

제안하는 기법은 비면허 대역의 IEEE 802.11 기반 CBTC를 위한 채널 접속 기법으로 셀룰러 기반의 통신 기법에는 적용되지 않는다.

III. 제안하는 분산 UORA 기법의 수학적 분석

본 논문에서는 승강장 환경에서 통신 범위 내에 수십 대의 통신 단말이 존재하며, 매우 빠른 주기로 정보를 전달하는 상황을 가정하여 단말들의 버퍼가 상시 충족되어 있는 상태를 가정한다. 또한, 열차 및 승강장의 센서 및 통신 기기들이 acknowledgement 과정을 거치지 않는 가장 높은 우선순위 access class (AC)의 방송 프레임의 전송을 가정한다. 따라서 단말들은 고정된 경쟁 윈도우, W , 를 사용한다.

본 논문의 분석에서는 단말의 개별 데이터 전송 과정을 Markov arrival/general service distribution/1 service channel (M/G/1) queuing 모델 기법을 바탕으로 모델링하여 시스템 최소 시간 단위인 슬롯시간, σ , 를 단위로 하는 이산 확률 생성 함수 (PGF; probability generation function)를 도출한 뒤, 전송 지연 값을 구하는 것을 목적으로 한다 [7].

단말은 전송 데이터가 발생할 시에 EDCA 랜덤 백오프를 수행하며, 데이터는 백오프 중 다른 단말에 의한 UORA가 발

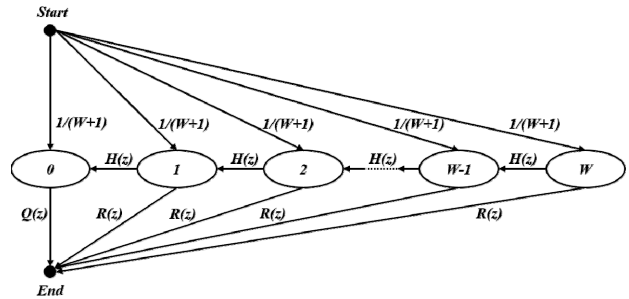


그림 2. 제안하는 분산 UORA의 데이터 전송 지연에 대한 확률 생성 함수 모델

Fig. 2. Probability generating function of service delay of the proposed distributed UORA.

생했는지 여부에 따라 UORA 혹은 EDCA를 통해 전송되어 시스템을 빠져나간다. 따라서 제안하는 기법의 M/G/1 모델은 그림 2와 같이 나타낼 수 있다.

그림 2에서 $H(z)$, $Q(z)$, $R(z)$ 는 각각 BO를 1 감소시키는 시간, EDCA로 데이터가 전송되는데 소요되는 시간, UORA로 데이터가 전송되는데 소요되는 시간의 PGF를 의미한다.

BO는 백오프의 최소 시간 단위인 슬롯시간, σ , 동안 채널이 유희하거나, 해당 슬롯이 다른 단말로 인해 점유 당하여 전송이 완전히 마쳤을 때 감소한다.

네트워크 상에 총 N 개의 단말이 존재하는 경우, 임의의 단말이 EDCA 백오프 중인 단말의 관점에서 슬롯 시간이 점유되어 있을 확률은 아래 수식과 같이 구할 수 있다.

$$P_b = 1 - (1 - \tau)^{N-1} \tag{1}$$

위 수식에서 τ 는 단말이 임의의 슬롯 시간에서 프레임을 전송하는 확률이며, 경쟁 윈도우 값을 W_0 라 하는 경우 다음과 같이 구할 수 있다 [8].

$$\tau = \frac{2}{W_0 + 1} \tag{2}$$

따라서, 제안하는 기법에서 단말들이 모두 동일한 시퀀스 동일한 길이의 데이터를 전송하고, 그 때의 전송 시간을 T_{DU} 라 할 경우, $H(z)$ 및 $Q(z)$ 는 아래와 같이 구할 수 있다.

$$H(z) = (1 - p_b)z + p_b z^{\lceil T_{DU}/\sigma \rceil} \tag{3}$$

$$Q(z) = z^{\lceil T_{DU}/\sigma \rceil} \tag{4}$$

UORA 전송은 단말이 성공적으로 TF-R을 수신하고, OBO가 0으로 감소하였을 때 발생한다.

백오프 중 임의의 슬롯 시간에 주변 단말로부터 성공적인 TF-R을 수신할 확률, P_{tx} ,은 다음과 같다.

$$P_{tx} = \binom{N}{1} \tau (1-\tau)^{N-1} \quad (5)$$

또한 OCWmin 값을 U , 하나의 TF-R에서 고정적으로 할당하는 임의의 접속 RU의 수를 M 이라 했을 때, 단말이 k 회의 TF-R 수신후에 OBO가 0으로 감소할 확률을 $P_{ra}^{(k)}$ 라 하면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{cases} P_{ra}^{(1)} = \frac{M}{\max(U, M)} \\ P_{ra}^{(2)} = (1 - P_{ra}^{(1)}) \frac{M}{\max(U - M, M)} \\ P_{ra}^{(3)} = (1 - P_{ra}^{(1)} - P_{ra}^{(2)}) \frac{M}{\max(U - 2M, M)} \\ \vdots \\ P_{ra}^{(k)} = \left(1 - \sum_{i=1}^{k-1} P_{ra}^{(i)}\right) \frac{M}{\max(U - (k-1)M, M)} \end{cases} \quad (6)$$

따라서 단말이 백오프 과정에서 TF-R을 수신하여 UORA 전송에 참여할 확률, P_{ra} ,은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_{ra} = \left(\sum_{k=1}^{\infty} k \cdot P_{ra}^{(k)}\right)^{-1} \quad (7)$$

식 (5), (7)을 통해 $R(z)$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$R(z) = P_{tx} P_{ra} z^{\lceil T_{DV}/\sigma \rceil} \quad (8)$$

표 1. 실험에 사용한 파라미터

Table 1. Simulation parameters.

aSlotTim/SIFS/AIFS	13/32/58 μ s
Transmission bandwidth	10 MHz
Legacy data subcarrier	48 subcarriers (156.25 KHz spacing)
Legacy OFDM symbol duration	8 μ s
D-UORA data subcarrier	216 subcarriers (39.0625 KHz spacing)
D-UORA OFDM symbol duration	32 μ s
Preamble duration	40 μ s
Number of RUs for D-UORA	3, 9 RUs
Datarate	12 Mbps
TF-R	38 Bytes
Data	30 Bytes
Contention window size	64,256
OCWmin	station density \times 100
Preamble detection range	150 m
Energy detection range	100 m

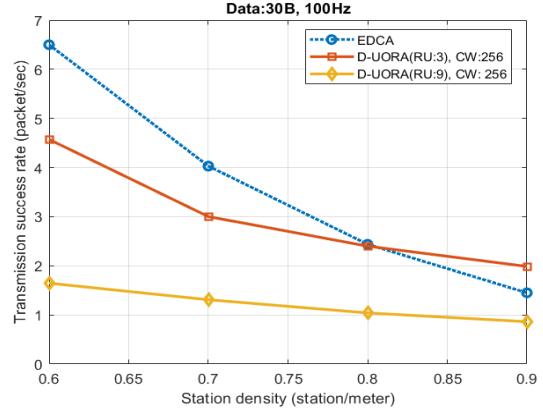


그림 3. 제안하는 기법의 전송 성공률 (경쟁 윈도우: 256)
Fig. 3. Transmission success rate of the proposed scheme (Contention window: 256).

그림 2의 모델의 각 경로에서 루프는 발생하지 않는다. 따라서 위 모델에 Mason의 공식을 적용하게 되면, 큐잉 모델의 전송 지연에 대한 PGF를 다음과 같이 구할 수 있다[7].

$$S(z) = \frac{R(z)}{W+1} \sum_{k=1}^W (W-k+1) \cdot H(z)^{k-1} + \frac{Y(z)}{W+1} \sum_{k=0}^W H(z)^k \quad (9)$$

따라서, PGF의 정의에 의해 평균 서비스 지연은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\overline{S} = S'(z)|_{z=1} \quad (10)$$

IV. 성능분석

본 논문에서는 제안하는 분산 UORA 기법의 성능을 기존의 무선랜과 비교하기 위하여 직접 설계한 MAC level matlab 시뮬레이션을 수행하였다. 본 시뮬레이션에서는 열차자율주행 환경과 같이 단말들이 이동성을 지니며, 고정된 AP (access point)가 존재하지 않는 OCB (outside the context of basic service set) 환경에서의 기존의 채널 접속 방식인 EDCA기법과 제안하는 분산 UORA의 단말 밀도 대비 패킷 전송 성공률을 도출하는 것을 목적으로 한다.

본 시뮬레이션에서 사용한 파라미터들은 표 1과 같다. 기존의 EDCA 방식의 경우 무선랜에서 이동성을 지원하기 위하여 제안된 IEEE 802.11p의 물리계층 특성을 사용하였으며, 제안하는 방식은 IEEE 802.11ax의 물리계층 특성을 기존 기법과 동등한 비교를 위하여 10MHz 채널 대역폭으로 하향 스케일링을 적용하였다.

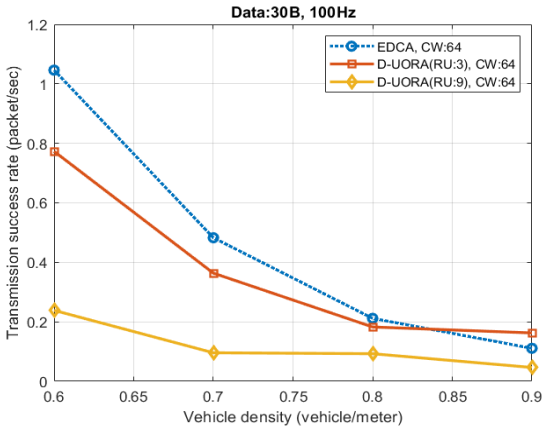


그림 4. 제안하는 기법의 전송 성공률 (경쟁 윈도우: 64)
 Fig. 4. Transmission success rate of the proposed scheme (Contention window: 64).

그림 3, 4는 경쟁 윈도우의 크기가 각각 256, 64로 설정된 상황에서 시간 당 전송 성공률을 도시한 그래프이다. 그래프에 따르면 혼잡도가 상대적으로 낮은 구간에서는 EDCA의 패킷 전송률이 더 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 채널 혼잡도가 낮은 상황에서는 채널 경쟁에 따른 오버헤드의 영향보다 데이터 전송에 소모되는 전송 점유 시간의 영향이 더 크기 때문이다. 제안하는 분산 UORA 기법은 설정하는 RU 크기에 따라 데이터 전송에 사용되는 점유시간이 선형적으로 증가하도록 되어있다. 반면에 분산 UORA는 임의의 접속의 특성상 채널은 점유하는 시간에 대한 채널 활용도를 항상 최대로 보장하지 않기 때문에 혼잡도가 낮은 상황에서는 큰 효율을 기대할 수 없다. 또한 혼잡도가 매우 낮은 상황에서는 버퍼가 비어있는 단말의 수가 감소하기 때문에 UORA의 접속률 자체가 할당된 RU 크기보다 작을 수 있으므로 제안하는 기법의 효율이 감소할 수 있다. 비슷한 이유로 채널 전송 시간이 길게 나타나는 9개 RU를 할당하는 상황의 성능이 가장 낮게 나타나는 것을 볼 수 있다.

반면, 채널 혼잡도가 증가함에 따라 기존의 EDCA 기법의 성공률이 급격하게 감소하는 반면, 제안하는 분산 UORA의 성공률은 완만하게 감소하는 것을 확인할 수 있다. 그래프에 따르면 경쟁 윈도우가 256인 경우 단말 밀도가 0.8 이상인 상황부터 성공률이 역전되어 지속적으로 성공률 격차가 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

표 1의 실험 파라미터에 따르면 데이터 생성 주기 당 최대 156 회의 전송이 가능하기 때문에 단말의 밀도가 0.7을 넘어서는 환경에서는 채널이 완전히 포화된 상태로 간주할 수 있다.

혼잡도가 증가하여 채널이 포화 상태가 되면 각 시간 슬롯에서의 성공률은 단말의 수와 경쟁 윈도우에 의해서만 결정되며, 데이터 전송 시간의 영향은 사라지므로, 충돌이 발생하지 않은 전송 상황에서 얻을 수 있는 최대 효율이 성능 좌우하게 된다.

기존 EDCA의 경우 1회 전송 당 하나의 데이터만 전송이 가능한 반면, 분산 UORA는 임의의 접속의 효율에 따라, 평균적으로 할당하는 임의의 접속 RU 개수의 0.37에 해당하는 추가 전송 효과를 얻을 수 있기 때문에 [9], TF-R 전송에 따른 오버헤드 증가에도 불구하고 통계적인 전송 성공률이 높아지는 것을 확인할 수 있다.

분산 UORA는 한 번의 채널 접속으로 다수 단말의 전송을 유도할 수 있으나, 충돌로 인하여 TF-R이 정상적으로 전달되지 않은 경우에는 OFDMA로 인하여 늘어난 데이터 전송 길이 만큼 추가적인 손실이 발생할 수 있다. 이러한 이유로 그림 4의 경쟁 윈도우 크기가 작은 상황에서 전송 성공률이 반전되는 시점이 더 늦어진다. 제안하는 기법은 EDCA 경쟁에 성공하지 않아도 채널에 접속할 수 있는 기회를 얻을 수 있으므로 경쟁 윈도우는 기존 대비 큰 값으로 설정하는 것이 성능 향상에 있어서 유리하다.

제안하는 기법은 채널이 혼잡한 환경에서 확실한 성능 향상 효과를 보이지만, 비혼잡 환경에서는 기존의 개별 채널 접속 방식의 효율이 높다. 열차 및 승강장은 운영 주체에 의해 관리 규제가 가능한 환경이므로, 운행하는 환경에 따라서 적응적으로 채널 접속 방식을 이용하는 것이 가장 바람직할 것으로 보인다.

V. 결론

본 논문에서는 자율주행열차 통신을 위한 혼잡 환경에서의 전송 기법을 제안하였다. 제안하는 분산 UORA 기법은 최신 6세대 무선랜 표준인 IEEE 802.11ax의 TUA (triggered uplink access) 기법과 UORA (uplink OFDMA random access) 기법을 분산적으로 적용하여 혼잡도가 매우 높은 승강장 진입 환경에서, 승강장 및 차량의 센서가 효율적으로 차량 및 승강장의 수집 장치에게 전달할 수 있도록 한다.

시뮬레이션 결과에 따르면 제안하는 분산 UORA 기법은 전체 데이터 전송 길이는 증가시키지만, 채널 접속 당 데이터 전송 효율이 높기 때문에 혼잡도가 높은 환경에서 기존의 채널 접속 방식 대비 전송 성공률에서 이득을 얻을 수 있는 것으로 나타났다.

Acknowledgments

본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2017R1A2B4003987).

References

- [1] T. Parkinson and I. Fisher, "Rail transit capacity," *Transportation Research Board*, Vol. 13, pp. 1-7, 1996.
- [2] S. C. Oh et al., Detail plan for development of train autonomous-driving control core technology, Korea Railroad Research Institute, Aug. 2016.
- [3] S. C. Oh et al., A study on the optimization of urban railway train operation system improvement for enhancing the safety and efficiency of train operation, Korea Railroad Research Institute, Oct. 2015
- [4] S. H. Kim, "Current Status and Implications of domestic and international railway wireless network construction," *KISDI Information & Communications Policy*, Vol. 25, No. 9, pp. 1-44
- [5] J. Goikoetxea, "Roadmap towards the wireless virtual coupling of trains," in *Proceeding of International Workshop on Communication Technologies for Vehicles*, San Sebastián: Spain, pp. 3-9, 2016.
- [6] IEEE, Draft 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 1: enhancements for high efficiency WLAN, IEEE P802.11ax/D5.1, 2019.
- [7] D. Gross, *Fundamentals of Queueing Theory*, 4th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2008.
- [8] G. Bianchi, "Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 18, No. 3, pp. 535-547, March. 2000.
- [9] W. Ahn, R. Y. Kim and Y. Y. Kim, "An energy efficient multi-user uplink transmission scheme in the next generation WLAN for internet of things," *International Journal of Distributed Sensor Networks (Online Journal)*, pp. 1-9, May. 2016.



안 우 진 (Woojin Ahn)

2016년 8월 : 연세대학교 전기전자공학과 (공학박사)
 2019년 9월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 열차제어통신연구팀 선임연구원
 ※ 관심분야 : 무선통신네트워크, 무선랜, 철도자율주행통신, 철도자율주행제어



김 용 호 (Ronny Yongho Kim)

2010년 2월 : 연세대학교 전기전자공학과 (공학박사)
 2012년 2월 ~ 현재 : 한국교통대학교 철도전기전자공학과 교수
 ※ 관심분야 : 무선통신네트워크, 사물인터넷, 무선랜, 이동체통신